



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOEL TORNBERG

UUDET JA UUSIUTUVAT ENERGIALÄHTEET LANGATTOMISSA
SENSORI- JA TUNNISTUSOVELLUKSISSA

Diplomityö

Tarkastajat: prof. Leena Ukkonen,
lab. ins. Lasse Söderlund
Tarkastajat ja aihe hyväksytty tieto-
ja sähkötekniikan tiedekuntaneuvos-
ton kokouksessa 8.10.2014.

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

TORNBERG, JOEL: Uudet ja uusiutuvat energialähteet langattomissa sensori- ja tunnistussovelluksissa

Diplomityö, 73 sivua, 7 liitesivua

Marraskuu 2014

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Tarkastajat: Leena Ukkonen, Lasse Söderlund

Avainsanat: RFID, uusiutuvat energialähteet, sensorisovellukset, tunnistussovellukset, semipassiivinen, passiivinen, aktiivinen, tagi,

Tässä diplomityössä perehdytään RFID – teknologian uusiin ja uusiutuviin energialähteisiin langattomissa sensori- ja tunnistussovelluksissa. Työn aiheistona käytetään alan kirjallisuutta ja tavoitteena on luoda yleiskuva jo käytössä olevista teknologioista ja mahdollisesti lupaavista kehityssuunnista.

Työssä käydään läpi sensori ja tunnistusteknologia yleisellä tasolla. Energialähteet on jaettu kahteen osaan: energiavarastoihin sekä uusiutuviin lähteisiin. Sovelluksista on esitetty nykYTEknologian käytännön esimerkkejä sekä tutkimustietoa todennäköisistä kehityssuunnista.

Yleisimmät RFID – sovelluksissa käytetyt energiavarastoteknologiat ovat erilaiset paristot sekä kondensaattorit. Paristoihin valikoitiin kuluttajamarkkinoiden energiatiheimmät teknologiat esimerkeiksi sekä tiettyjen RFID-sovellusten erikoisvaatimukset täyttävät teknologiat. Työn kannalta mielenkiintoisin on superkondensaattoritEknologia.

Uusiutuvilla energialähteillä tähdätään jatkuvaan energian saatavuuteen toimintaympäristön rajoitusten sekä mahdollisuuksien ehdoilla. Uusiutuvat energialähteet tulevat tarpeellisiksi erityisesti erilaisissa anturisovelluksissa, joissa anturi kerää tietoa ja tallentaa jatkuvasti.

Työhön sisältyy lisäksi mittausosio, jossa tutkitaan semipassiivisen ja passiivisen tagin ominaisuuksia. Mittausten tarkoituksena on antaa esimerkki semipassiivisen tagin toiminnasta ja verrata sitä passiivisen tagin toimintaan. Semipassiivisen tagin energiavaraston johdosta sen passiivista suurempi lukuetaisyys sekä kyky herätä pienilläkin lukijan lähetystehoilla voitiin todentaa selkeästi mittauksissa.

Energiavarastojen sekä uusiutuvien energialähteiden kehitys on pääosin materiaalitekniikan sekä laitteiden valmistusmenetelmien alueella. Lisäksi uusiutuvien energialähteiden alueella sovelluskohteesta ja tuotantomenetelmästä riippuen voidaan systeemin hyötysuhdetta kasvattaa maksimitehopisteen seurannalla.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

TORNBERG, JOEL: New and renewable energysources in wireless sensor and identification applications

Master of Science Thesis, 73 pages, 7 Appendix pages

November 2014

Major: Alternative Electric Energy Technologies

Examiners: prof. Leena Ukkonen lab. ins. Lasse Söderlund

Keywords: RFID, Renewable Energy Sources, Sensor Applications, Identification Applications, Semipassive, Passive, Active, Tag,

This thesis concentrates on new and renewable energy sources in sensor and identification applications. The material for this thesis consists of literature in the area of study. The purpose is to create an overview of existing technologies and possibly promising development directions.

This paper goes through sensor and identification technology on a general level. Energy sources have been divided into two categories: energy storages and renewable energy sources. Examples of applications currently in practical use with current technology and research data on probable directions for the technology have been presented.

Most commonly used energy storage technologies in RFID-applications are batteries and capacitors. The most energy dense battery technologies available in consumer market were chosen, and in addition a few that fulfilled the special requirements of certain RFID-applications. Supercapacitors were chosen to represent the other energy storage technology, since they represent the most energy dense subcategory of capacitors.

Renewable energy sources aim to provide continuous availability of energy in the limitations of environment and provided possibilities. Renewable energy sources become especially necessary in sensor network applications, where a sensor node collects and records data continuously.

Furthermore the thesis includes a measurement part that examines the properties of semipassive and passive tags. The goal is to provide insight in how a semipassive tag works and compare it to a passive tag. The measurements were able to clearly demonstrate semipassive tags longer reading distances and capability to wake up with very small reader signal strengths due to its internal power source, when comparing it to a passive tag, which relies on the readers signal to power the circuit.

Energy storages and renewable energy sources development views rely mainly in the fields of material technology and device production technology. Furthermore in the field of renewable energy sources, maximum power point tracking can be used to improve the overall efficiency of the system, depending on the application and energy production method.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston elektroniikan ja tietoliikennetekniikan laitokselle. Työssä tarkastellaan uusia ja uusiutuvia energialähteitä langattomissa sensori- ja tunnistussovelluksissa. Työn kirjoitusosuus suoritettiin pääosin kevään ja kesän 2014 aikana.

Kiitän lämpimästi tästä mahdollisuudesta elektroniikan ja tietoliikennetekniikan laitosta, Lauri Sydänheimoa ja työni mittausosion kanssa minua avustanutta Toni Björnistä. Erittäin lämpimät kiitokset työni ohjaajalle Leena Ukkoselle, jolta sai neuvoa ja motivointia sitä tarvittaessa. Lisäksi erittäin lämpimät kiitokset Lasse Söderlundille, jonka osuus työni kanssa oli lyhyt mutta ytimekäs yli kahden tunnin keskustelu, jossa kävimme työn sivu sivulta läpi.

Kiitokset myös koko perheelle, jotka kannustivat, neuvoivat ja auttoivat oikoluenan kanssa työn eri vaiheissa.

Tampereella 16.10.2014

Joel Tornberg

SISÄLLYS

1	Johdanto	v
2	Langaton sensori ja tunnistusteknologia	3
2.1	Kytkeytymistavat	4
2.2	Passiivinen RFID-piiri	10
2.3	Semipassiivinen RFID-piiri (BAP)	10
2.4	Aktiivinen RFID-piiri	10
2.5	Lukijat	11
3	Langattomien sensori ja tunnistussovelluksien energialähteet	12
3.1	Energiavarastot	12
3.1.1	Paristot	12
3.1.2	Kondensaattorit	14
3.2	Uusiutuvat energialähteet	17
3.2.1	Lämpöenergia	18
3.2.2	Mikrosähkömekaaninen energia (MEMS)	24
3.2.3	Radiotaajuisen energian keräys	33
3.2.4	Tuulienergia	38
3.2.5	Valosähköiset paneelit	46
4	Semipassiivisen ja passiivisen tagin mittaukset	52
4.1	Mittausten suunnittelu	52
4.2	Mittausmetodit	54
4.3	Tulokset	56
5	Johtopäätökset	66
	Lähteet	68
	Liite 1	74
	Liite 2	76
	Liite 3	77
	Liite 4	78
	Liite 5	79
	Liite 6	80

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

A	amplitudi
A_f	sähkövuon keräyspinta
B	magneettivuon tiheys
C	kapasitanssi
C_p	tuuliturbiinin hyötysuhde
D	pulssisuhde
D	sähkövuon tiheys
E	sähköentän voimakkuus
\vec{E}	sähkökentän voimakkuus
E_n	energiatila
E_{stored}	varautunut energia
$FSPL[dB]$	vapaan tilavuuden häviö
G	valosähköisen paneelin hyötysuhde
G_R	vastaanottavan antennin vahvistus
$G_{TX ANT}$	antennin vahvistus
$G_{RX ANT}$	vastaanottavan antennin vahvistus
G_T	lähetysantennin vahvistus
\hbar	redusoitu Planckin vakio
i	sähkövirta
I_{mp}	virta maksimitehopisteessä
I_{sc}	piirin oikosulkuvirta
k	induktanssien suhdeluku
L_p	polarisaatiohäviö
L_z	kvanttikaivon energiatilat
L_1	lukijan kelan induktanssi
L_2	tunnisteen kelan induktanssi
M	keskinäisinduktanssi
m	hiukkasen efektiivinen massa
$Margin RL[dB]$	Linkbudget mittauksen reverse-linkin laskennassa käytettävä muuttuja.
P_{charge}	latausteho
P_1	lukijan antennissa syntyvät häviöt
P_2	tunnisteen antennissa syntyvät häviöt
P_T	lähetysteho
P_W	tuulen energia
P_m	mekaaninen teho
P_{max}	maksimiteho
P_{RX}	vastaanotettu teho
$P_{TL, TH}$	tagin käynnissä pitämiseen kuluva teho

$P_{TF, TH}$	tagin käynnistymiseen vaadittava teho
P_{RX}	vastaanotetun signaalin teho
P_{TX}	lähetysteho
P_{EIRP}	(effective isotropic radiation power) efektiivinen isotrooppinen säteilyteho
$P_{EIRP,BS,limit}$	vastaanotettavan signaalin minimitehon raja.
$P_{tag,BS}$	tagista takaisin heijastuvan signaalin teho
P_{tag}	lähetysteho, jolla tagi herää
$P_{max,EIRP}$	sallittu maksimi lähetysteho
Q	elektrodien kokonaisvaraus
Q_1, Q_2	hyvyyslukuja
R	roottorin pyyhkäisevän ympyrän säde
RSS	(residual sum of squares) neliösumman jäännös
R_{maz}	lukuetäisyyden maksimin
$R_{max,BS}$	maksimi takaisinheijastuvan signaalin lukuetäisyys
$R_{sense}, R_{opt,ref}$	resistansseja
t	ajan hetki
T	aikajakso
U tai V	jännite
V_c	kuvaa tunnisteen antennin kykyä vastaanottaa signaalia tietyssä loistehotiheydessä
V_d	kuvaa lukijan antennin kykyä luoda tietty loistehotiheys tunnisteen kohdalle
W_Q	loisteho
ZT	hyvyysluku
Z_a	antennin impedanssi
Z_{IC}	IC-piirin impedanssi
α	Seebeckin hyötysuhde
ε_0	tyhjiön permittiivisyys
ε_r	väliaineen suhteellinen permittiivisyys
η	hyötysuhde
λ	aallonpituus
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
ρ	resistiviteetti
Φ_E	sähkövoima
ϕ_n	energiatilaa aaltoyhtälö
ω	kulmataajuus
AC	vaihtovirta
AM1.5	spektri standardi
BAP	(battery assisted passive tag) paristoavusteinen passiivitagi tai semipassiivinen tagi

CNT	(carbon nano tube)hiilinanoputki
DC	tasavirta
EDLC	kaksikerroskondensaattori
EEPROM	haihtumaton puolijohdemuisti
EIRP	(effective isotropic radiated power) Efektiivinen istotrooppinen säteilyteho
EPC	sähköinen tuotekoodi
ERP	(effective radiated power) efektiivinen säteilyteho
GSM	(Global System for Mobile Communications) matkapuhelin- järjestelmä, jota käytetään maailmanlaajuisesti
HAWT	(horizontal-axis wind turbine) vaaka-akselinen tuulivoimala
HF	(high frequency) radioaaltojen taajuusalue välillä 3–30 kHz
Kapton	polymeeri- eristekerros
LF	(low frequency) radioaaltojen taajuusalue välillä 30–300 kHz
MEMS	mikrosähkömekaaninen energia
MOSFET	(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) transisto- rityyppi
MPPT	(maximum power point tracking) maksimitehopisteen seuranta
OVP	ylijännitesuoja
PANI	polyaniliini
PDL	(passive data logger) passiivinen data-loggeri
PET	polymeeri- eristekerros
PVA	polyvinyylialkoholi
PWM	(pulse width modulator) pulssinleveysmodulaattori
RFID	(Radio Frequency Identification) radiotaajuinen etätunnistus
SECE	(synchronous electric charge extraction)
SSHI	(synchronized switch harvesting on inductor)
TEG	(triboelectric generator) hankaussähköön perustuva gene- raattori
TENG	(triboelectric nanogenerator) hankaussähköön perustuva na- nomateriaaleilla toteutettu generaattori
UHF	(Ultra High Frequency) mikroaaltojen taajuusalue välillä 0,3—3 GHz
USB	(universal serial bus) sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen
VAWT	(vertical-axis wind turbine) pysty-akselinen tuulivoimala
WEH	(wind energy harvesting) energian tuottamista tuulesta
WiFi	(wireless fidelity) langaton lähiverkkotekniikka

1 JOHDANTO

Ihmiskunnan ensimmäiset viestit, joissa käytettiin sähkömagneettisia aaltoja viestintä-
tajina, rajoittuivat spektrin näkyviin aallonpituuksiin. Valolähdettä ja heijastavaa pintaa
hyväksi käyttäen pystyttiin lähettämään viestejä pitkiäkin matkoja öisin, jolloin viesti ei
hukkunut ympäröivän valon aiheuttamaan kohinaan. Sähkömagneettisen säteilyn koha-
nasta saattaa nykyäänkin aiheutua vastaavia ongelmia tietyissä olosuhteissa, vaikka stan-
dardit ja laitesuunnittelu pyrkivät minimoimaan näitä tilanteita.

Ennen 1800-lukua kokeellinen tieto sähköstä, magnetismista ja valon luonteesta
kasvoi voimakkaasti. Vuonna 1846 Michael Faraday ehdotti, että valo sekä radio-aallot
ovat sähkömagneettista säteilyä. Muutama vuosikymmen tämän jälkeen Maxwell julkaisi
teoriansa sähkömagnetismista, mikä ennusti sähkömagneettisen säteilyn synnyn. Hertz
todisti Maxwellin yhtälöiden ennustaman säteilyn vuonna 1887 rakentamalla ensimmäi-
sen laitteen, jolla pystyi lähettämään sekä vastaanottamaan radioaaltoja. Kun Marconi
rakensi ensimmäisen Atlantin yli kantavan radioaalloilla toimivan lennättimen, ihmiskun-
nan kyky viestiä mullistui [1].

Kuten monilla muillakin keksinnöillä, radiotaajuisen etätunnistusteknologian juu-
ret ovat sotateollisuudessa. Tarve langattomaan tunnistukseen oli suuri, koska omat jou-
kot haluttiin erottaa vihollisista. Ensimmäisen maailmansodan aikana englantilaiset pilo-
tit huomasivat ilmataisteluissaan saksalaisia vastaan, että saksalaiset suorittivat vaakakierteen yhtäaikaaisesti ilman näkyvää syytä. Myöhemmin englantilaisille kävi ilmi, että
saksalaiset pystyivät kommunikoimaan liikkeellä tutkaoperaattorin kanssa. Vaakakierre
moduloi tutkasignaalin heijastusta, joka pystyttiin lukemaan poikkeavana kaikuna tutka-
näytöllä. Tällöin tutkaoperaattori pystyi tunnistamaan omat lentokoneet viholliskoneista.
Kyseessä oli sotatarkoitukseen käytetty yksinkertainen radiotaajuinen etätunnistus, jossa
lukijana toimi tutka ja passiivisena tunnisteena lentokone vaakakierteessä [2, s. 7].

Langattomat sensori- ja tunnistusovellukset sitovat fyysistä maailmaa tietokan-
toihin. Nykyään tunnistava osa yhtälöä on kuitenkin edelleen usein ihminen. Ihmisellä on
ainutlaatuinen tunnistuskyky verrattuna koneisiin. Ihmisten käyttö on kuitenkin kallista
ja usein tehotonta suurien määrien tunnistamisessa. Lisäksi ihmiset ovat taipuvaisia vir-
heisiin toistuvissa toiminnoissa. Koneet pystyvät tunnistamaan toistuvasti väsymättä ja
oikein suunniteltuina tekemättä virheitä. Niiden tunnistuskyky on kuitenkin erittäin rajoi-
tettu. Ne eivät osaa juuri improvisoida tunnistettavan kappaleen osuessa tunnistuspara-
metrien ulkopuolelle. Asia on ratkaistu yksinkertaistamalla tunnistettavia kappaleita li-
säämällä niihin tunniste, jota voidaan lukea tarkoitukseen sopivalla lukijalla, esimerkkinä
viivakoodi. Pinta-asennus altistaa ne likaantumiselle ja hajoamiselle, jolloin lukeminen
ei enää onnistu. Lisäksi viivakoodi voi olla pinnalla, johon ei päästä helposti kulkemaan,

esimerkiksi seinää vasten. Lukutoimenpiteisiin kuluu paljon aikaa isoissa varastoissa sekä mahdollisuus virheisiin on edelleen suuri. Tarve helpompaan, varmempaan ja nopeampaan tunnistamiseen on siis olemassa.

Radiotaajuista etätunnistusta käyttämällä, monet viivakoodeihin liittyvät ongelmat voidaan välttää, mutta samalla tilalle tulee joitakin uusia. Tunnistus tapahtuu lukijalla, jolla luetaan määrätylle taajuudelle viritettyä tunnistetta, eli tagia. Tietokantoja voidaan hallita kuljettamalla luettavat tuotteet esimerkiksi lukijaporttien läpi tai käyttämällä etälukijaa. Tunnisteet voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin: passiivisiin ja aktiivisiin. Passiivisen tunnisteen erikoistapauksena ovat semipassiiviset tunnistet, mutta toimintaperiaate on molemmissa sama. Sekä passiiviset että semipassiiviset tunnistet heijastavat lukijan lähettämän signaalin moduloituna takaisin, eli ne eivät sisällä erillistä lähetintä. Aktiiviset tunnistet sisältävät lähetimen. Yleistäen voidaan sanoa, että passiivisten ja semipassiivisten tunnistetiden lukuetaisytydet ovat aktiivisia heikommat. Lukuetaisytyksiin perehdytään työssä myöhemmin.

Etätunnistimien käyttö voi parhaassa tapauksessa automatisoida kirjaamisen tietokantoihin täysin, jolloin ihmisten suorittamia toimenpiteitä ei tarvita. Tunnisteet voidaan sijoittaa pakkauksien sisään tai valmistaa ne kestämään paremmin kappaleiden pinnalla. Lisäksi tunnistet voidaan automatisoida mittaamaan haluttua suuretta esimerkiksi lämpötilaa, kosteutta, valoa ja värähtelyä.

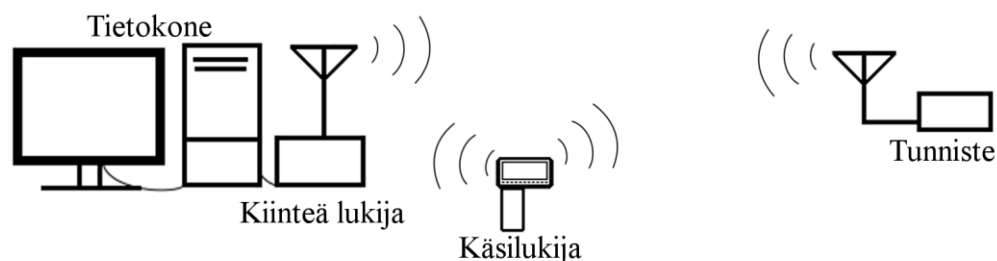
RFID-tekniikka (radio frequency identification) on yleistynyt vauhdilla 90-luvusta lähtien. Nykyään RFID-tekniikkaa käytetään esimerkiksi eläinten tunnistamiseen, liikenteen seurantaan, kansainvälisen rahdin tunnistamiseen sekä seurantaan, kirjastoissa lainakirjojen tunnistamiseen ja seurantaan, kulunvalvontaan ja erilaisissa anturisovelluksissa. Tekniikan suosio kasvaa suoraan verrannollisesti sen tuotantohintaan. Tuotantohinnan aleneminen tarkoittaa, että tunnistetia lisätään yhä halvempiin kohteisiin seurannan nopeuttamiseksi ja parantamiseksi, kuten esimerkiksi tavaratalojen tuotteiden ja postipakettien kertakäyttöluonteinen seuranta

Tämä diplomityö on kirjallisuusselvitys uusiutuvista energian tuotantomuodoista sekä uusista energiavarastoista anturi ja tunnistussovelluksissa. Lisäksi työssä testataan elektroniikan ja tietoliikennetekniikan laitoksen tilaama patteriavusteinen UHF RFID-piiri (ultra high frequency) ja verrataan sitä passiivisen RFID-piirin ominaisuuksiin. Diplomityön toisessa luvussa käsitellään RFID-teknologioiden kytkeytymistapoja ja rajataan RFID-teknologiat toimintaperiaatteensa mukaan. Työn kolmannessa luvussa käsitellään langattomien sensori ja tunnistussovellusten energialähteitä, jotka on jaettu varastoihin ja uusiutuviin energialähteisiin. Neljäs luku käsittelee semipassiivisen ja passiivisen tagin mittauksia. Luvussa käydään läpi mittausten suunnittelu, metodit sekä tulokset. Diplomityön johtopäätösluvussa käydään läpi keskeisimmät tulokset sekä johtopäätökset.

2 LANGATON SENSORI JA TUNNISTUSTEKNOLOGIA

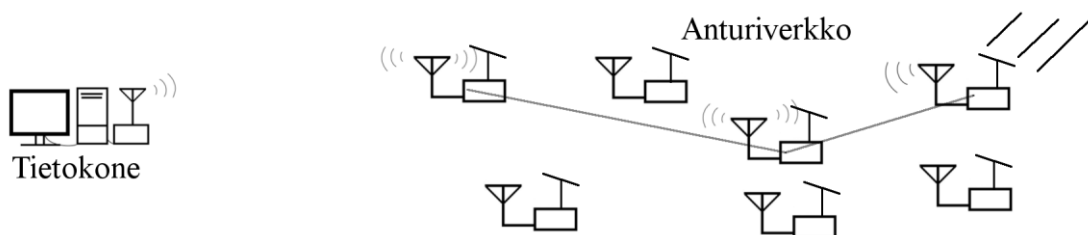
Langaton kytkeytyminen voi tapahtua esimerkiksi väliaineen kautta sähkömagneettisten kenttien välityksellä. Tulevaisuudessa kommunikointi voi tapahtua myös hiukkasilla. Tarkemmin neutriinoilla, jolloin on mahdollista käyttää suorinta reittiä kahden pisteen välillä, maapallon läpi [3]. Edellä mainitut tavat sisältävät väliaineen paineenvaihteluiden koko taajuusalueen infraäänestä ultraääneen ja sähkömagneettisten aaltojen koko spektrin. Tässä työssä tullaan käsittelemään vain radiotaajuisia aaltoja, ja tarkemmin UHF-aluetta.

Radiotaajuinen etätunnistussysteemi sisältää kaksi osaa: tunnisteen sekä lukijan. Tunnisteet ovat yleensä yksinkertaisia piirejä, jotka sisältävät informaatiota, kuten numeron tai joissain sovelluksissa anturidataa. Lukija on tunnistetta yleensä huomattavasti monimutkaisempi laite ja sisältää enemmän ominaisuuksia, esimerkiksi yhteyden tietokoneeseen. Kuvassa 2.1. on esitetty yleiskuva RFID-systeemistä. Kiinteällä lukijalla tarkoitetaan esimerkiksi lukijaportteja tai tukiasemaa ja käsilukijalla kannettavaa lukijaa, joka on langattomasti yhteydessä tietokoneeseen. Tunniste voi olla passiivinen, semipassiivinen tai aktiivinen, riippuen käyttökohteesta.



Kuva 2.1. Kuvassa on esitetty yleiskuva RFID-systeemistä.

Kuvan systeemi on yksinkertaistettu malli todellisesta systeemistä. Systeemejä voi olla hyvinkin erilaisia. Esimerkiksi maanvyörymien seurannassa anturit ovat aktiivisia sekä yhteydessä toisiinsa. Niiltä vaaditaan pientä tehonkulutusta, sekä omaa sähköntuotantoa jatkuvan toiminnan mahdollistamiseksi. Laitteet sijaitsevat usein vaikeissa olosuhteissa, joihin ei ole turvallista mennä vaihtamaan teholähteitä [4]. Kuvassa 2.2. on esitetty aurinkopaneeleilla sähköistetyin aktiivisen anturiverkon periaatekuva.



Kuva 2.2. Anturiverkon periaatekuva.

Anturit pystyvät toimimaan signaalin toistimina tarpeen vaatiessa, jos lukijan signaalin voimakkuus ei ole riittävä kaukaisimmille antureille.

Tunnisteet voidaan jakaa eri tyyppeihin muutamalla tavalla. Yksi tapa on jakaa ne passiivisiin ja aktiivisiin, joita käsitellään työssä myöhemmin. Toinen tapa on jakaa tunnistet ominaisuuksiensa mukaan: luettaviin ja luettaviin sekä kirjoitettaviin. Kolmas tapa on jakaa tunnistet kytkeytymistavan mukaan lähi- tai kaukokentän kautta kytkeytyviin systeemeihin.

2.1 Kytkeytymistavat

Lähi ja kaukokentät eroavat toisistaan siten, että lähikentässä on, joko sähkö- tai magneettikenttä hallitseva. Kaukokentässä sähkö- ja magneettikentät ovat tyypillisesti kohtisuorassa toisiinsa ja etenemissuuntaan nähden. Sähkökenttään kytkeytyminen on sopivalla antennilla mahdollista sekä lähi- että kaukokentässä. Lähikenttäkytkennät on kuitenkin käytännössä toteutettu usein magneettikentän välityksellä.

Matalataajuiset (LF) käyttävät 125kHz ja 134.2kHz taajuuksia. Ne toimivat lähikentässä ja lukuetaisyydet ovat muutamien senttimetrin luokkaa. Matalia taajuuksia käytettäessä tunnistet voidaan kiinnittää materiaaleihin, jotka normaalisti häiritisivät korkeampia taajuuksia. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi kappaleet, jotka sisältävät vettä, metallin pinta, puu ja eläinkudos. Matalataajuustunnisteilla on taajuusalueista heikoin tiedonsiirtonopeus, ja tästä syystä ne yleensä sisältävät vain vähän tietoa. Lisäksi niiden monilukumahdollisuudet ovat heikot signaalien törmäyksien takia. LF-tunnisteet sopivat edellä mainituista syistä johtuen hyvin esimerkiksi kulunvalvontaan, omaisuuden seurantaan ja eläinten tunnistukseen. Nykyään LF-tunnisteita käytetään autoteollisuuden ajoneuvotolaitteissa. Avainpesään on asennettu lukija, joka tunnistaa avaimen lukee avaimen tunnisteen ja aktivoi ajoneuvon, jos tunniste on väärä. Tunnisteen antennina toimii useimmiten kuparikela, jossa on satoja kierroksia ferriittisydämen ympärillä. [5. s.7]

Korkeataajuiset (HF) tunnistet toimivat 13,56 MHz taajuudella. Ne toimivat samalla periaatteella kuin matalataajuiset tunnistet ja käyttävät lähikenttää virranlähteenä. Korkeataajuisien tunnistetiden lukuetaisyys on parempi kuin matalataajuisilla, ja toimivat vielä noin 50 senttimetrin etäisyydeltä. Lisäksi niillä on parempi tiedonsiirtonopeus ja suurempi muisti. HF-tunnisteisiin on mahdollista saada LF-tunnisteita parempi signaalien törmäyksen sieto, mutta usein ominaisuus jätetään pois johtuen lyhyistä lukuetaisyyksistä

ja valmistushinnan kasvusta. Korkeataajuisien tunnisteen antennit ovat yleensä yksinkertaisia monikierroksisia johteita, kuten kuparia tai alumiinia litteänä spiraalina. Antennit voidaan valmistaa erikokoisiksi ja erittäin ohuiksi, mikä pienentää valmistuskustannuksia. HF-tunnisteet toimivat hyvin samoissa olosuhteissa, kuin LF-tunnisteetkin, mutta tunnisteen läheisyydessä sijaitsevat metallikappaleet voivat vaikuttaa lukemiseen. Korkeataajuiset tunnisteen ovat maailman käytetyin RFID-tekniikka. Niitä käytetään esimerkiksi luottokorteissa, älykorteissa, kirjastoissa kirjojen seurantaan sekä matkatavaroiden seurantaan lentokentillä [5. s.8].

Matala- sekä korkeataajuiset tunnisteen toimivat lähikentässä joko sähkö tai magneettikentän välityksellä. Sähkökentän kautta tapahtuvassa kytkeytymisessä sähkövuoto induoi varauksen antennina toimivaan johteeseen, joka värähtelee kentän taajuudella. Kentän mukana värähtelevä varaus luo antenniin virran [6]. Ahson ja Ilyas [6, s. 255] ovat kehittäneet vertailua helpottavan yhteystilavuusteorian (coupling volume theory). Teoria mahdollistaa selkeän vertailun magneetti- ja sähkökentän kautta kytkeytyvien systeemien välillä.

Tarkastelemalla loistehon tiheyttä tunnisteen kohdalla, on mahdollista määrittää hyötysuhde tunnisteen antennille seuraavasti

$$V_c = \frac{[\text{Loisteho tunnisteen virittämättömään kondensaattoriin. kun piiri on avoin}]}{[\text{Lukijan luoma loistehon tiheys tunnisteen kohdalla}]} \quad (1)$$

Lukijan antennille hyötysuhde määritetään seuraavasti

$$V_d = \frac{[\text{Loisteho lukijan kentän luovan kapasitanssin elektrodeihin}]}{[\text{Lukijan luoma loistehon tiheys tunnisteen kohdalla}]} \quad (2)$$

V_c kuvaa tunnisteen antennin kykyä vastaanottaa signaalia tietyssä loistehotiheydessä ja V_d kuvaa lukijan antennin kykyä luoda tietty loistehotiheys tunnisteen kohdalle. Kun molemmat antennit ovat viritetty, on mahdollista laskea häviötehojen suhde yhtälöllä

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_c}{V_d} Q_1 Q_2, \quad (3)$$

missä P_1 on lukijan antennissa syntyvät häviöt, P_2 on tunnisteen antennissa syntyvät häviöt, Q_1 on lukijan antennin hyvyysluku ja Q_2 on tunnisteen antennin hyvyysluku. Yhtälön muotoilun etuna on, että yhteystilavuus V_c (coupling volume) on riippuvainen ainoastaan tunnisteen muuttujista ja kentän dispersiotilavuus (dispersal volume) V_d on riippuvainen ainoastaan lukijan muuttujista. Tämä mahdollistaa laitteiden toisistaan riippumattoman optimoinnin.

Antennin yhteystilavuus riippuu antennin kyvystä kerätä sähkövuotoa, kun se asetetaan sähkövuon tiheyteen D . Vuon keräyspinta-ala A_f määritellään alueena avaruudessa, joka vaaditaan että, lukijan luoma värähtelevä sähkökenttä luo tunnisteen antenniin kentän mukana värähtelevän virran i . Vuon keräyspinta-ala ei välttämättä vastaa antennin fyysistä pinta-alaa. Antennin virta saadaan seuraavasta yhtälöstä

$$i = j\omega D A_f, \quad (4)$$

jossa ω on sähkökentän kulmataajuus. Antennin loisteho W_Q voidaan määrittää seuraavasti

$$W_Q = \frac{|i|^2}{2\omega C}, \quad (5)$$

jossa C on antennin ominaiskapasitanssi, kun piiri on avoin. Sähkökentän energiatiheys kulmataajuudella ω voidaan laskea yhtälöllä (Poyntingin vektorin sähkökentän energia)

$$W_v = \frac{\varepsilon |E|^2 \omega}{2}, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (7)$$

missä ε_0 on tyhjiön permittiivisyys ja ε_r väliaineen suhteellinen permittiivisyys (ilmalle $\varepsilon_r = 1,0006$), E on sähkökentän voimakkuus ja ω sähkökentän kulmataajuus. Sijoittamalla antennin virran yhtälö (4) antennin loistehon yhtälöön (5) ja jakamalla se sähkökentän loistehotiheyden yhtälöllä (6) saadaan

$$V_c = \frac{\varepsilon A_f^2}{C}. \quad (8)$$

Yhtälöllä voidaan laskea yhteystilavuus mille tahansa antennille, jonka itseiskapasitanssi C ja pinta-ala A_f ovat tunnetut. Pinta-ala A_f pystytään laskemaan yhtälöllä (4) asettamalla antenni sähkökenttään, jonka voimakkuus tunnetaan. Tämä jälkeen mitataan antenniin indusoitunut virta i .

Lähikentän lukija-tunniste pari käyttää hyvin usein magneettikenttää kytkeytymiseen. Lukijan luoma virittävä kenttä voidaan ajatella energiavarastona, eikä tehoa juurikaan siirry, jolloin piiriteorian soveltaminen on mahdollista. Lukijan magneettikentän luova kela sekä tunnisteiden kentän tunnistava kela voidaan kuvata magneetti-piirinä, jossa lukijan kelaa kuvaa induktanssi L_1 ja tunnisteiden kelaa induktanssi L_2 ja keskinäisinduktanssia muuttuja M . Lukijan ja tunnisteiden häviötehojen suhde voidaan laskea, kun molemmat kelat ovat viritetty resonanssiin ja niiden hyvyysluvut Q_1 ja Q_2 ovat tunnetut. Häviötehojen suhteen yhtälö on

$$\frac{P_2}{P_1} = k^2 Q_1 Q_2, \quad (9)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (10)$$

Yhtälö (9) osoittaa, kuinka lukijan ja tunnisteiden hyvyysluku Q vaikuttaa resonanssipiirin hyötysuhteeseen, mutta kuvaa huonosti lukijan kykyä luoda magneettikenttä tunnisteiden kohdalle, ja toisaalta tunnisteiden kykyä tunnistaa magneettikenttä.

Kuvaavampaa on, kun otetaan huomioon kuinka suuri loistehotiheys on tunnisteiden kohdalla ja kuinka paljon tunnisteiden antenni pystyy ottamaan siitä talteen. Lisäksi päästään eroon muuttujasta k , joka on kompleksinen. Tunnisteiden antennin yhteystilavuus voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä

$$V_c = \frac{[\text{Loisteho tunnisteiden oikosuljettuun virittämättömään kelaan}]}{[\text{Lukijan luoma loistehon tiheys tunnisteiden kohdalla}]}. \quad (11)$$

V_c kuvaa tunnisteiden antennin kykyä vastaanottaa signaalia tietyssä tehotiheydessä. Lukijan antennille määritetään dispersiotilavuus V_d seuraavasti

$$V_d = \frac{[\text{Loisteho lukijan kelaan}]}{[\text{Lukijan luoma loistehon tiheys tunnisteiden kohdalla}]}. \quad (12)$$

V_d kuvaa lukijan antennin kykyä luoda tietty loistehotiheys tunnisteiden kohdalle. Kun molemmat antennit ovat viritetty, saadaan häviötehojen suhteeksi

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_c}{V_d} Q_1 Q_2 \quad (13)$$

Tällöin yhteystilavuus on tunnisteiden antennin ominaisuuksista riippuva ja dispersiotilavuus lukijan antennin muuttujista riippuva muuttuja. Tämä mahdollistaa lukijan ja tunnisteiden ominaisuuksien erillisen optimoinnin.

Kaukokenttä sovellukset käyttävät ultra korkeaa taajuutta (UHF). Tämä on rajoitettu standardeilla 433 MHz, 860–960 MHz (Euroopassa 860–970 MHz) ja 2.4GHz. Alempaa 433MHz:n taajuutta käytetään aktiivisissa tunnisteissa ja ylempää taajuusalueita yleensä passiivisiin tunnisteisiin. Passiivisten UHF RFID-systeemien lukuetaisyydet ovat yleensä alle kymmenen metriä. [5. s. 8]. Semipassiivisilla tunnisteilla lukuetaisyydet voivat ylittää sadan metrin etäisyyksiin. Aktiivisilla tunnisteilla lukuetaisyydet voivat olla useita kilometrejä. UHF-antennit perustuvat usein dipoliantenniin, jonka pituus on 900 MHz:n puolialtrodipoliantennilla noin 15 cm tai 6 cm 2.4 GHz:n taajuudelle viritettynä. Pienempiä antennia on mahdollista valmistaa kaistanleveyden tai suorituskyvyn kustannuksella [2 s.30-40]. Antennin fyysistä kokoa voidaan pienentää esimerkiksi oikein suunnitellulla taittelulla, fraktaali geometrialla tai kerrostamalla. Antennit on helppo valmistaa tasoon, esimerkiksi piirilevyille. Toisin kuin LF- ja HF- taajuusalueet, UHF-alue on erittäin herkkä kappaleille, jotka sisältävät vettä, eläinkudosta tai metallia. Nämä materiaalit eivät päästä UHF-aaltoja läpi, tai muuttavat niiden taajuutta. Aallot eivät läpäise mahdollisia johteita, jotka ovat niiden kulkureitillä. Kaikki UHF-alueen protokollat mahdollistavat, jonkun asteisen signaalien törmäyksen estokyvyn, joka mahdollistaa monen tunnisteiden yhtäaikaista lukemista. [5. s. 8]

Maxwellin yhtälöt luovat mallin sähkömagneettiselle ilmiölle. Gaussin lain mukaan sähkövuon tiheys $D = \epsilon \vec{E}$ ilmassa ja tyhjiössä suljetun pinnan S läpi on verrannollinen pinnan sisälleen sulkemaan varaukseen Q .

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}. \quad (14)$$

Gaussin laki (15) magneettikentälle \vec{B} kertoo, että suljetun pinnan läpäisevän magneettivuon summa on nolla.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (15)$$

Ampere-Maxwellin laki (16) kertoo, että sähkövirta ja muuttuva sähkövuon luovat magneettikentän \vec{B} mielivaltaisen pinnan sisään. Laskemalla integraali pinnan reunakäyrän ympäri saadaan

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \oint_S \left(J_l + \frac{d\vec{D}}{dt} \right) d\vec{A}, \quad (16)$$

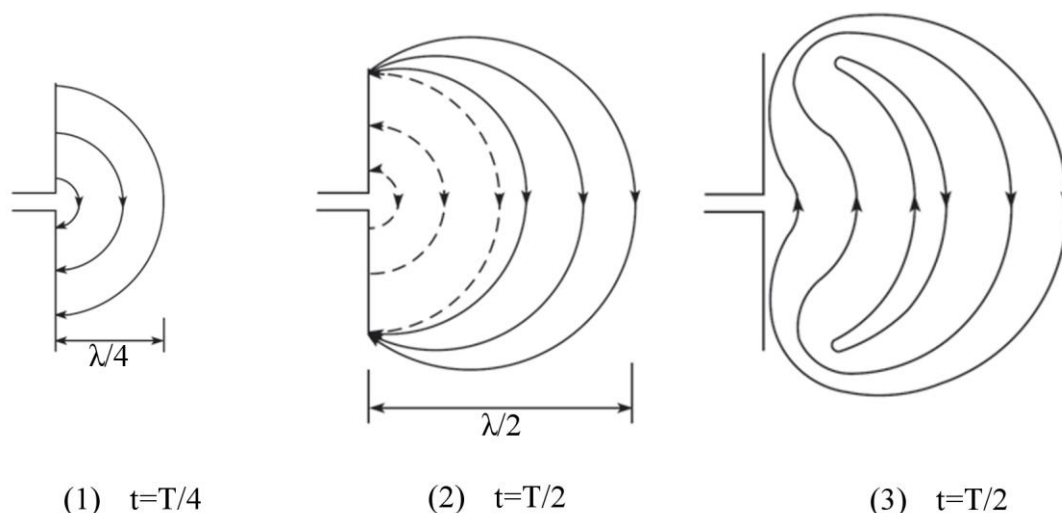
missä $\frac{d\vec{D}}{dt}$ on sähkövuon tiheyden muutos ajan suhteen ja J_l virrantiheys. Neljäs ja viimeinen Maxwellin laeista on Faradayn laki (17). Sen mukaan muuttuva magneettivuon luo sähkökentän, jolloin saadaan

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (17)$$

missä $\frac{d\Phi_B}{dt}$ on magneettivuon muutos ajan suhteen. Magneettisen monopolin löytymisen jälkeen [7] yhtälöt (15) ja (17) voidaan muuttaa ottamaan huomioon magneettinen nettovaraus [8]. Magneettinen monopoli on kuitenkin toistaiseksi pystytty valmistamaan vain synteettisesti, ja sitä ei ole huomattu luonnossa [7]. Joten työssä pitäydytään yhtälöiden perinteisessä muodossa.

Aaltoyhtälöiden johtaminen Maxwellin yhtälöistä on suhteellisen työläs prosessi, jonka tulos on kuitenkin kiinnostava. Kiihtyvässä liikkeessä olevat varaukset luovat muuttuvia sähkö- ja magneettikenttiä, jotka voidaan havaita sähkömagneettisena säteilynä säteilevän kappaleen kaukokentässä. Tietyllä taajuudella värähtelevä varaus aiheuttaa samalla taajuudella ja samassa vaiheessa värähtelevän sähkömagneettisen aallon. Esimerkiksi dipoliantennissa varaustiheys ei pysy samana koko antennin matkalla, jolloin sopivalla taajuudella suhteessa antennin pituuteen voidaan muodostaa seisova sähkömagneettinen aalto. Aalto voi muodostua sähkö tai magneettikentän kautta riippuen antennin resistanssista ja geometriasta. Suuri resistanssi johtaa suureen sähkökentänvoimakkuuteen, jolloin muuttuva sähkökenttä luo magneettikentän, joka luo sähkökentän, ja niin edelleen. Toisaalta suuri virta johtaa suureen magneettikenttään, joka luo syntyvän sähkömagneettisen aallon sähkökentän. Sähkömagneettisen aallon sähkö- ja magneettikentät

ovat toisiinsa nähden kohtisuorassa ja niiden suuruus ja amplitudi toisiinsa suoraan verrannollisia. Vastaanottavassa antennissa sähkömagneettinen aalto luo antenniin sähkömotorisen voiman, joka värähtelee aallon mukana [5. s.1214-1241]. Kuvassa 2.3. on esitetty sähkömagneettisen aallon synty dipoliantennissa. Kuvassa 2.3. kohdassa (1) nähdään, kuinka sähkökentän voimaviivat muodostuvat varsien väliin. Sinimuotoisessa signaalissa varaus on saavuttanut maksimin ajanhetkellä $t = T/4$, missä T on koko ajanjakso, ja voimaviivat ovat neljäsosa aallonpituuden λ etäisyydellä antennista. Seuraavalla ajanhetkellä $t = T/2$ voimaviivat ovat edenneet $\lambda/4$ verran edellisestä ja varaustiheys johteissa on alkanut pienentyä. Voidaan ajatella, että varsiin ohjataan vastakkaismerkkisiä varauksia, jotka ensimmäisen ajanjakson puolikkaan lopussa, ovat kumonneet johtimien varauksen. Vastakkaismerkkisten varausten voimaviivat kulkevat $\lambda/4$ pituisen matkan ensimmäisen ajanjakson puolikkaan toisella neljänneksellä, ja ovat kuvassa 2.3. kohdassa (2) esitettynä katkoviivalla. Lopputuloksena saadaan, että kenttäviivat osoittavat ylöspäin ensimmäisellä aallonpituuden neljänneksellä $\lambda/4$ ja alaspäin toisella neljänneksellä. Koska dipoliantennissa ei ole nettovarausta jäljellä sähkökentän voimaviivojen on täytynyt irrottautua antennista, ja muodostaa suljettuja silmukoita, kuten kuvassa 2.3. kohdassa (3). Sama prosessi toistuu ajanjakson toisen puolikkaan lopussa, mutta lähtevät voimaviivat ovat erisuuntaiset [9, s.2-3].



Kuva 2.3. Sähkömagneettisen aallon sähkökentän muodostuminen dipoliantennissa.[9, s. 3s]

Kun sähkömagneettinen aalto kohtaa vastaanottavan antennin ihanteellisessa tapauksessa vastaanottava antenni joko absorboi signaalin tai heijastaa sen täydellisesti. Signaalin heijastaminen takaisin on haluttavaa silloin, kun kyseessä on passiivinen tai semipassiivinen tagi. [4, s.4-15].

2.2 Passiivinen RFID-piiri

Passiiviset tagit ovat halvimpia, mutta niissä on vähiten toiminnallisuutta. Niissä ei ole sisäänrakennettua energialähdettä, jolloin kaikki energia kerätään lukijan signaalista. Lukijan signaalin teho täytyy olla riittävä käynnistämään tagin piiri sekä kantamaan takaisin heijastunut signaali lukijalle. Tästä syystä passiivisten tagien lukuetaisyydet ovat muita tyyppisiä lyhyemmät. Kun tagia ei lueta, se on täysin pois päältä, jolloin se ei myöskään aiheuta häiriöitä muille laitteille. Passiiviseen tagiin ei edellä mainituista syistä kykene suorittamaan minkäänlaista aktiivista anturin seurantaa. Tageilla on teoriassa loputon toiminta-aika ja ne ovat tyypeistä halvimpia valmistaa. Halvan hinnan ja suhteessa pienen toiminnallisuuden takia ne ovat usein kertakäyttöisiä, joten tagin elinikä on verrannollinen seurattavan kappaleen ikään. Passiivisissa tageissa on pienen muistikapasiteetti muihin tyypeihin verrattuna. [5, s.30] [2, s. 34-42] [4, s.4]

2.3 Semipassiivinen RFID-piiri (BAP)

Semipassiivisia tageja kutsutaan myös patteriavustetuiksi tageiksi. Niissä on sisäänrakennettu energialähde tarjoamaan piirille riittävästi energiaa käynnissä pysymistä varten, mutta ei erillistä lähetintä. Piirin käyttöenergia otetaan sisäisestä energiavarastosta, joten lukijan signaalin energiasta pystytään käyttämään huomattavasti enemmän takaisinheijastukseen. Lukuetaisyys on passiivisia tageja suurempi ja ylittää noin 30 metriin. Ympäristön monitorointi on mahdollista aina piirin ollessa päällä, esimerkiksi lämpötilan monitorointi kylmäketjuissa. Lähettimen puuttumisen takia, semipassiiviset tagit eivät luo häiriöitä käyttämälleen taajuuskaistalle. Tageissa on passiivisia suurempi muistikapasiteetti, mikä mahdollistaa tapahtumahistorian tallennuksen. Fyysisiltä mitoiltaan semipassiiviset tagit ovat passiivisia suurempia ja raskaampia, riippuen energiavaraston koosta. Sisäänrakennettu energiavarasto määrittää käytännössä tagin eliniän. Energiavarasto toimintaympäristö, kuten lämpötila, vaikuttaa sen elinikään ja toimintaan. [5, s.30] [2, s. 34-42] [4, s.4]

2.4 Aktiivinen RFID-piiri

Aktiivisissa RFID tageissa on erillinen energialähde, aktiivinen vastaanotin sekä aktiivinen lähetin. Erillisen energialähteen sekä lähettimen takia tagin ei tarvitse suurta lukijan signaalinvoimakkuutta, jotta se voisi heijastaa signaalin takaisin. Aktiivisten tagit voivat kommunikoida toistensa kanssa ja muodostaa verkon. Sensoriverkkojen yksittäistä sensoria voidaan ajatella aktiivisena tagina. Erillisen lähettimensä ansiosta, tagien lukuetaisyydet voivat olla jopa kilometrejä, riippuen energialähteestä sekä lähettimestä. Lisäksi aktiivinen vastaanotin mahdollistaa erittäin heikon signaalin vastaanoton. Aktiiviset tagit voivat käyttää eri taajuuksia lähetykseen ja vastaanottoon. Erillinen lähetin sekä vastaanotin mahdollistavat aktiivisten tagien käytön paikoissa, joissa on suuria määriä metallia, joka tyypillisesti häiritsee erittäin paljon passiivisten ja semipassiivisten tagien käyttöä. Aktiivisiin tageihin voidaan lisätä enemmän toiminnallisuutta sekä muistia, kuin passiivisiin

ja semipassiivisiin tageihin. Tagien piireihin voidaan lisätä ympäristön monitorointi sensoreita sekä tietojenkäsittelyä. Suuren muistin johdosta ne voivat tallentaa ympäröivien tagien lähettämää informaatiota, käsitellä sitä ja lähettää eteenpäin, esimerkiksi tagit jotka käyttävät Zigbee protokollaa kommunikointiin. Tageissa voi olla unitila, jossa se kuluttaa vähiten tehoa. Herätyssignaali herättää tagin, jolloin suoritetaan halutut toiminnot, jonka jälkeen tagi palaa takaisin unitilaan energian säästämiseksi. Herätyssignaalina toimii esimerkiksi lukijan signaali, ohjelmoitu aikaherätys tai monitoroitujen arvojen muutos. Aktiivisten tagien yksi suuri etu semipassiivisiin tageihin on energiavaraston tilan monitorointi. Esimerkiksi pariston loppuminen voidaan huomata ajoissa ja lähettää tieto eteenpäin ennen kuin tagi menettää toimintakykynsä. Aktiiviset tagit ovat tyypeistä kaikkein kalleimpia, joka rajoittaa niiden käyttöä. Lähettimen ansiosta tagit lisäävät suuresti häiriöitä lähetystaajuudelleen. [5, s.30], [4, s.4], [2, s. 34-42]

2.5 Lukijat

Tagin jälkeen tärkein osa RFID systeemiä on lukija. Lukijan täytyy olla yhteensopiva tagin kanssa ja noudattaa standardeja. Lukijan täytyy pystyä kaksisuuntaiseen liikenteeseen, josta seuraa että ne pystyvät lukemaan sekä yleensä myös kirjoittamaan tietoa tageille. Passiivitagien tapauksessa niiden täytyy pystyä käynnistämään piiri. Lukijoissa täytyy olla riittävästi toiminnallisuutta, jotta ne voidaan kytkeä tietokantoihin esimerkiksi suoraan tietokoneeseen. Tämä riippuu käyttökohteesta. Lukijat komponentit voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan, jotka ovat: lähetin, vastaanotin sekä prosessori. Tämän lisäksi lukijaan kuuluu erillinen käyttöliittymä sekä erilaisia rajapintoja ulkoiseen kommunikointiin, esimerkiksi USB, bluetooth tai WiFi. Lukijatyypit voidaan jakaa kiinteisiin, kädessä pidettäviin sekä ajoneuvoihin kiinnitettäviin lukijoihin. Kiinteät lukijat voivat olla esimerkiksi lastauslaiturin läheisyydessä valvomassa tavaravirtaa. Antennit voivat muodostaa synkronoituja ryhmiä, jotka tarjoavat parhaan mahdollisen katealueen. Lisäksi lähettävät sekä vastaanottavat antennit ovat erillään. Käsikäyttöiset lukijat ovat lukijatyypeistä pienimpiä ja niiden lukunopeus on muihin verrattuna hidas. Ajoneuvoihin asennettavat lukijat ovat usein asennettu kiinteästi laitteeseen, kuten trukkeihin ja rekkoihin. Ne valvovat tavaraliikennettä kiinteän lukijan tavoin, mutta pienemmällä alueella. Lukijoissa täytyy myös olla hyvä häiriönsieto, koska käytetyllä taajuusalueella voi toimia useita lukijoita, josta seuraa signaalin törmäyksiä. [5, s.41]

3 Langattomien sensori ja tunnistussovelluksien energialähteet

Erilaiset energialähteet tulevat kyseeseen vain semipassiivisten sekä aktiivisten tagien kohdalla. Energialähteet voidaan jakaa varastoihin ja uusiutuviin energialähteisiin. Aktiiviset tagit sekä anturiverkot tarvitsevat jatkuvan teholähteen tai riittävän suuren energiavaraston. Monesti anturiverkkojen tapauksessa systeemit sisältävät sekä uusiutuvan lähteen sekä energiavaraston. Semipassiivisten tagien tapauksessa käytetään useimmiten vain energiavarastoja.

3.1 Energiavarastot

RFID-sovelluksissa käytettävä energiavarasto on useimmiten joko jonkun tyyppinen paristo tai kondensaattori. Paristot tarjoavat pitkäaikaisemman energiavaraston, koska ne pystyvät säilyttämään varauksensa pidemmän aikaa kuin kondensaattorit. Yleistäen voidaan sanoa, että kondensaattorit kestävät paremmin lataus ja purku jaksoja ja niiden elinikä on pidempi. Tilanteissa joissa energiaa on saatavilla katkonaisesti, voidaan kondensaattoria käyttää väliaikaisena varastona. Semipassiivisissa tageissa käytettävät energialähteet ovat useimmiten paristoja ja paristo määrittää tagin eliniän.

3.1.1 Paristot

Paristo on laite, joka varastoi energiaa sähkökemiallisesti. Puhekielessä paristoilla viitataan usein primääriparistoihin. Primääriparistojen kemialliset reaktiot eivät ole palautuvia, joka tekee niistä kertakäyttöisiä. Sanalla akku viitataan sekundääriparistoon, joiden reaktiot ovat palautuvia. Sekundääriparistot voidaan näin ollen varata uudelleen purkujakson jälkeen. Paristot koostuvat elektrodeista ja niiden välisestä elektrolyytistä. Positiivisesti varautunutta elektrodia kutsutaan katodiksi ja negatiivisesti varautunutta anodiksi.

RFID – sovellukset asettavat monissa tilanteissa rajoituksia, joita voivat olla esimerkiksi pariston koko, valmistuskustannukset, mekaaniset ominaisuudet, energiatiheys, saatavuus, lataus tai kertakäyttöisyys ja kierrätys. Monet näistä ominaisuuksista liittyvät toisiinsa joko suoraan tai epäsuorasti. Paristoteknologia on erittäin laaja-alue, joten käsitelen työssäni paristoja vain erityisesti RFID – sovelluksien erikoisvaatimusten valossa.

Kuluttajamarkkinoiden energiatihimmät sekundääriparistot ovat litium – teknologiaan pohjautuvia. Litiumiin pohjautuvia akkuja on useita, mutta tehokkaimmat perustuvat litium-kobolttiin (LiCoO_2), ja niiden energiatiheys on luokkaa 400–640 Wh/l tai 175 – 200 Wh/kg. Litium – ioni akun materiaalista, kuten litium-koboltti, puhuttaessa viitataan usein katodin materiaaliin. Anodi valmistetaan useimmiten grafiitista. Litium – akkujen lataus on hankalaa verrattuna esimerkiksi nikkelimetallihydridi (NiMH) akkuihin. Ylilataus voi johtaa räjähdysvaaraan. Lisäksi niiden syväpurkautuminen on erittäin

haitallista kennojen eliniälle. Litium – akut tarvitsevat siis aina yli- ja alijännitesuojan. [10], [11].

Primääriparistojen kohdalla on tärkeää, että ne voidaan vaihtaa ja kierrättää. Matalatehoisissa elektroniikkasovelluksissa käytetään monesti nappiparistoja. Nappiparistojen anodit ovat usein sinkkiä ja katodit hopeaoksidia ($\text{Zn-Ag}_2\text{O}$). Sinkki-hopeaoksidi paristojen energia tiheys on 130 Wh/kg. Litiumiin pohjautuvia primääriparistoja on monia, mutta suurimman energitiheyden 300 Wh/kg [12, s. 28] omaa Litium-rikkimonoksidikloridi (Li/SOCl_2) elektrodeilla valmistettu paristo. [12, s. 28]

Lee et al. [13] esittää vertailun litium – ilma (Li - air) sekä sinkki – ilma (Zn - air) paristoteknologioista, jotka vaikuttavat lupaavilta akkuteknologioilta. Litium – teknologian puolesta puhuu erittäin suuri teoreettinen energiatiheys (>1100 Wh/kg). Käytännössä on saavutettu 5200 Wh/kg energiatiheys. Ongelmia tuottaa litium – ilma kennojen anodin reaktioherkkyys. Litium reagoi herkästi kosteuteen, josta seuraa että valmistusmenetelmät vaativat inerttiä ympäristöä. Lisäksi litium – reagoi herkästi elektrolyytin kanssa. Sinkki – ilma kennojen valmistus on yksinkertaisempaa, ja käytössä turvallisempaa, koska ne eivät ole herkkiä kosteudelle. Lisäksi valmistusmateriaalit ovat huomattavasti halvempia verrattuna litium – kennoihin. Sinkki – ilma paristoja pidetään myös tekniseltä tasoltaan lähempänä käytännön sovelluksia, mutta kennojen uudelleen varaus on kriittinen este akkusovelluksissa. Kennon teoreettinen energiatiheys on 1084 Wh/kg. [13]

Kennojen koko on usein standardoitu ja kennot pakataan jäykkään koteloon, joten erityissovelluksien valmistaminen voi osoittautua hankalaksi. Uusia teknologioita RFID – sovelluksissa edustaa erilaiset hyvin ohuet, monesti joustavat sekä valmistuskustannuksiltaan potentiaalisen halvat paristot.

Paperipohjaiset tai paperin kaltaiset paristoteknologiat osoittavat suurta potentiaalia, pitäen mielessä tiettyjen RFID – sovelluksien erikoisvaatimukset. Niiden ominaisuuksiin luetaan, erittäin hyvä suorituskyky, monikäyttöisyys, joustavuus ja helppo kierrätys. Paperi on halpaa, helposti saatavissa, ohutta, kevyttä, biohajoavaa ja tarjoaa hyvän suuri pinta-alaisen alustan pariston aktiivisille materiaaleille. Lisäksi paperi houkuttelee, koska se pystyy siirtämään nestettä kapillaari-ilmion vaikutuksesta, joka tarkoittaa että ulkoisia pumppuja ja putkia ei tarvita. Nesteille voidaan luoda kanavia kuvioimalla paperille vettä hylkiviä alueita. Kuviointi voidaan suorittaa esimerkiksi optisella litografialla (photolithography), printtaamalla vaha paperille ja laserilla. Paperipohjaisia teknologioita on monia. Kuluttajamarkkinoilla löytyy esimerkiksi Power Paper mangaanidioksidi sinkki paristo, jota käytetään tämän työn mittausosion semipassiivisessa tagissa. [14] Liitteessä 1 on esitetty taulukko, jossa on esitetty markkinoilta jo löytyviä teknologioita [15]. Taulukosta käy ilmi valmistaja, käytetty teknologia, käyttöjännite, fyysinen koko ja käytännön sovellukset. Monet käytetyistä paristoteknologioista perustuvat jo olemassa oleviin paristoteknologioihin. Joustavuus on saavutettu paristojen tukirakenteiden joustavuudella sekä uusilla valmistusmetodeilla.

Aliahmad et al. [16] esittävät paperipohjaisen litium-ioni akun. Virran keräiminä toimi puukuiduista valmistetut elektrodit, jotka päällystettiin hiilinanoputkillla sähkösta-

tisesti layer-by-layer prosessilla. Päälystetyistä puukuiduista muodostettiin paperinkaltainen materiaali, joka tarjoaa suuren pinta-alan elektrodien kiinnitykseen. Puukuituja käyttämällä pystyttiin pienentämään käytetyn hiilinanoputken määrää. Käytetyt elektrodimateriaalit olivat massa muodossa. Koko kennon anodina käytettiin litiumtitaanioksidia (LTO) ja katodina litiumkobolttioksidia (LCO). Lisäksi valmistettiin LTO sekä LCO puolikennot. Puolikennoissa voidaan ajatella olevan vain yksi elektrodi sekä ympäröivä johtava elektrolyytti. Kapasiteetiksi muodostui LCO-puolikennoille 150 mAh/g LTO-puolikennoille 158 mAh/g ja LTO/LCO koko kennolle 126 mAh/g. [16]

3.1.2 Kondensaattorit

Kondensaattori on komponentti, jolla on kyky varastoida energiaa sähkökenttään. Rakenteeltaan perinteinen levykondensaattori koostuu kahdesta elektrodista, jotka on eristetty toisistaan. Elektrodien väliin muodostuvan sähkökentän voimakkuus E tyhjiössä ja ilmassa, missä $\epsilon_r = 1$ voidaan laskea Gaussin yhtälöllä (14) ja, kun hajakenttää ei huomoida, saadaan muotoon

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 A}, \quad (18)$$

missä Q on elektrodien kokonaisvaraus, ϵ_0 on tyhjiön permittiviteetti ja A elektrodin pinta-ala. Yksinkertaistus voidaan tehdä, jos kyseessä on vastinlevykondensaattori jonka elektrodit ovat pinta-aloiltaan yhtä suuret sekä yhtä kaukana toisistaan. Lisäksi huomioitavaa on, että eristemateriaalin permittiivisyys vaikuttaa kapasitanssiin huomattavasti.

Olettamalla että kenttä on tasainen ja elektrodien välinen etäisyys d pysyy samana, voidaan kondensaattorin jännite U laskea yhtälöllä

$$U = Ed, \quad (19)$$

Kapasitanssi C määritellään kokonaisvarauksen suhteena elektrodien väliseen jännitteeseen. Kondensaattorin kapasitanssi kuvaa kondensaattorin kykyä varata energiaa tyhjiössä ja ilmassa.

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{A}{\epsilon_0 d} \quad (20)$$

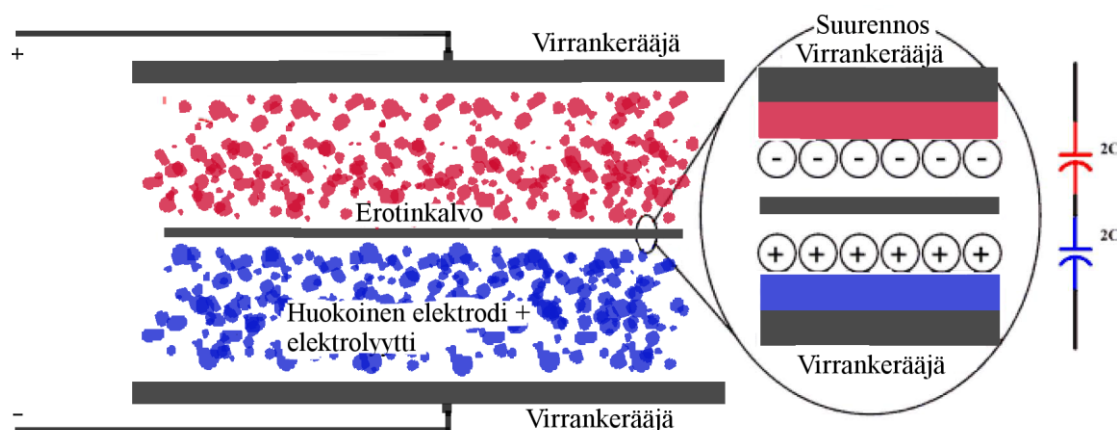
Sähkökentän voimakkuus on suoraan verrannollinen kokonaisvaraukseen. Tästä seuraa, että myös jännite on suoraan verrannollinen kokonaisvaraukseen. Jos kondensaattorin kokonaisvaraus kasvaa, niin jännite kasvaa samassa suhteessa. Kondensaattorin kyky varata energiaa riippuu vahvasti elektrodien pinta-alasta, elektrodien välisestä etäisyydestä ja eristysmateriaalin ominaisuuksista. Levykondensaattoriin varautunut energia E_{stored} voidaan esittää kapasitanssin C ja jännitteen U avulla seuraavasti

$$E_{stored} = \frac{1}{2}CU^2 \quad (21)$$

Tietyn tyyppiset kondensaattorit pystyvät varaamaan energiaa sähkökenttään sähkökemiallisesti. Tämän tyyppisiä kondensaattoreita kutsutaan pseudokondensaattoreiksi. Kapasitanssin laskeminen pseudokondensaattoreille on monimutkainen prosessi, sillä se riippuu kondensaattorin rakenteesta sekä käytetyistä materiaaleista. [17]. [18 s. 908-911]

Yleisimpiä kondensaattorityyppejä ovat keraamiset kondensaattorit, filmikondensaattorit, elektrolyyttikondensaattorit sekä superkondensaattorit. Energiavarastoksi parhaiten sopii superkondensaattori sen verrattain suuren energiatihedyyden takia.

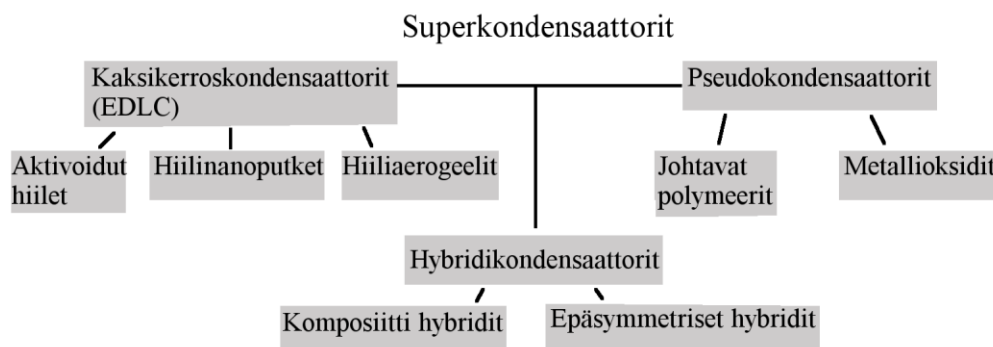
Superkondensaattori on sähkökemiallinen kondensaattori, joka koostuu kahdesta polarisoidusta huokoisesta elektrodista. Perinteiseen kondensaattoriin muodostuu yksi sähkökenttä elektrodien välille. Superkondensaattorissa kennoon muodostuu molemmille elektrodeille varauskerrokset, jolloin sähkökenttiä muodostuu kaksi. Kuvassa 3.1. on esitetty superkondensaattorin periaatteellinen rakenne. [19]



Kuva 3.1. Kuvassa esitetty superkondensaattorin periaatteellinen rakenne. [19]

Elektrodit on kyllästetty elektrolyytillä ja niitä erottaa erotinkalvo. Erotinkalvon tulee olla huokoinen, jotta ionit pystyvät läpäisemään sen, mutta kalvon on kuitenkin eristettävä sähkökentät toisistaan. Kondensaattorin navat muodostuvat rakenteen molemmiin puoliin virrankerääjille. [19]

Superkondensaattorit jaetaan kolmeen alaryhmään: sähköisiin kaksikerroskondensaattoreihin (electrical double-layer capacitors, EDLC), pseudokondensaattoreihin sekä hybridikondensaattoreihin. Kuvassa 3.2. on esitetty superkondensaattorien tyypit sekä alatyypit



Kuva 3.2. Kuvassa esitetty superkondensaattorien tyypit ja alatyypit. [20]

Kaksikerroskondensaattorin suuri kapasitanssi perustuu erittäin suuriin elektrodien pinta-aloihin, jotka saavutetaan käyttämällä nanomateriaaleja. Kyseessä on siis pääosin sähköstaattiseen varaukseen perustuva kondensaattori. Energiatiheys EDLC:llä on luokkaa 1-10Wh/l. [17], [20]

Pseudokondensaattoreissa sähköiset varaukset kertyvät pääasiassa suhteellisen palautuvista hapetus-pelkistysreaktioista, eli varausten kertyminen elektrodeille perustuu sähkökemialliseen ilmiöön. Hapetusreaktio vapauttaa elektroneja ja pelkistys sitoo niitä. Syntyneitä ioneja kertyy elektrodin pinnalle. Reaktiota kutsutaan faradiseksi virraksi. Pseudokondensaattorien huono puoli on niiden valmistuksessa käytettävien materiaalien kallis hinta ja vaihtoehtoisten halvempien materiaalien riittämätön stabiilisuus. Pseudokondensaattoreiden energiatiheys on suhteellisen suuri 10-50 Wh/l. [17], [20]

Hybridikondensaattorit yhdistävät kaksikerroskondensaattorin sähköstaattisia ominaisuuksia sekä pseudokondensaattorin sähkökemiallisia ominaisuuksia. Tämä on toteutettu epäsymmetrisellä elektrodirakenteella, joista toinen perustuu faradiseen ja toinen sähköstaattiseen varautumiseen. Hybridikondensaattoreilla on kaksikerroskondensaattoria suurempi jännitekestoisuus sekä pseudokondensaattoria parempi lataus-purkaus syklien kesto. Hybridikondensaattorien tyypillinen tehotiheys on 10 - 20 Wh/kg [20]

Meng et al [21] esittävät hybridikondensaattorin, joka on rakenteeltaan joustava. Kondensaattorin elektrodit valmistettiin hiilinanoputki- sekä polyaniliininanokomposiitti (PANI/CNT) ohutkalvoista. Elektrolyyttinä käytettiin H_2SO_4 -polyvinyylialkoholigeeliä (PVA-gel). Valmistuksessa otettiin huomioon elektrolyytin tasainen jakautuminen sekä hiilinanoputkirakenteen säilyttäminen mahdollisimman ehjänä. Rakenteeltaan kondensaattori oli 5 mm * 50 mm * ~ 0,110 mm, jossa paksuus jaettiin kahteen elektrodiin ~ 22 - 37 μm , elektrodien välillä olevaan PANI - elektrolyyttigeelikerrokseen ~ 30 - 45 μm sekä elektrodien ulkopuolta peittävään ~8 μm geelikerrokseen. Hiilinanoputkirakenteen kyllästysasteen arvoitiin olevan noin 65 prosenttia painosta. Valmistettu kondensaattori ei menettänyt kapasitanssia, kun rakennetta testattiin kiertämällä ja taittamalla. [21]

3.2 Uusiutuvat energialähteet

Uusiutuvilla energialähteillä tähdätään jatkuvaan energian saatavuuteen toimintaympäristön rajoitusten sekä mahdollisuuksien ehdoilla. Uusiutuvat energialähteet tulevat tarpeellisiksi erityisesti erilaisissa anturisovelluksissa, missä anturin tarvitsee kerätä tietoa ja tallentaa jatkuvasti. Anturiverkot sekä erilaiset monitorointisovellukset vaativat usein mahdollisimman jatkuvaa tehotuotantoa paikoissa, joihin saattaa olla vaikea tai lähes mahdoton päästä asennuksen jälkeen. Lisäksi anturiverkot saattavat olla hyvin laajoja, jolloin tehollisten vaihtaminen tasaisin väliajoin ei enää ole kustannustehokasta. Tällaisten anturiverkkojen lähetystehojen on myös oltava suuria, jolloin hetkittäinen tehonkulutus sekä kumulatiivinen energiankulutus kasvaa huomattavasti. Energian keräys toimintaympäristöstä yhdistetään usein ”asenna ja unohda” (deploy and forget) ajatusmalliin. Energiavarastot lisäävät laitteiden kokoa ja hintaa huomattavasti, johtuen paristoteknologioiden toistaiseksi heikosta tilavuuden tehotiheydestä. [22]

Työssä tarkastellaan yleisimpiä RFID-sovelluksien uusiutuvia energiateknologioita. Esittelen teknologian toimintaperiaate, esimerkki sekä teknologialle mahdollisesti lupaava kehityssuunta. Käsiteltyjä teknologioita ovat lämpöenergia, tuulienergia, mikrosähkömekaaninen energia, radiotaajuinen energian keräys sekä valosähköiset paneelit. Kaikilla näillä teknologioilla on vahva riippuvuussuhde toimintaympäristöön, joka määrittää lopulta kuinka hyvin teknologia toteuttaa tarkoitustaan.

Lämpösähköllä on jo kaupallisia sovelluksia, kuten kelloissa [23] ja teknologian kehitys on edelleen käynnissä. Parannusmahdollisuuksia on materiaalitekniikan alueella, joka saattaa johtaa lisäoptimoinnin tarpeeseen maksimitehopisteen seurannassa.

Mikrosähkömekaaninen energian varten otettavimmat teknologiat ovat pietsosähköön sekä hankaussähköön perustuvat elementit. Pietsosähköisillä elementeillä on kaupallisia sovelluksia ja kehitysmahdollisuudet ovat materiaalitekniikan sekä maksimitehopisteen seurannan alueella. Hankaussähköön perustuvista elementeistä löytyi vain kokeellisessa vaiheessa olevia sovelluksia, mutta teknologia vaikuttaa lupaavalta [24].

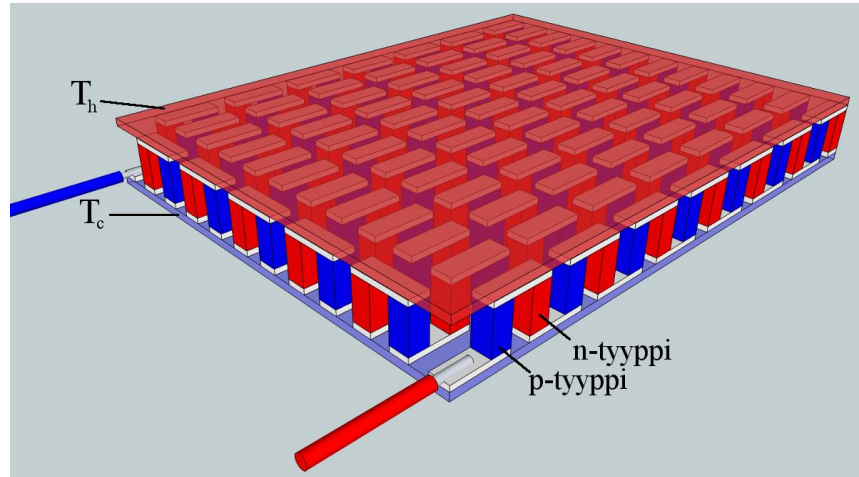
Radiotaajuinen energian keräys on toimivaksi todettu, mutta osoittaa lähinnä välikäsitteellisesti olevia kehitysmahdollisuuksia, johtuen rajoitetuista lähetystehoista. Tämä rajaa kehityksen laitteen energiatehokkuuden parantamiseen sekä maksimitehopisteen seurantaan.

Tuulisähkö edustaa kypsää teknologiaa ja sen toimivuus on vahvasti paikasta riippuvainen. Turbiinien hyötysuhteen parantaminen on lähinnä tuuliolosuhteisiin optimointia. Systemin toimintaa pystytään optimoimaan maksimitehopisteen seurannalla. Huomioitavaa on, että pienistä milliwattiluokan voimaloista sekä niiden optimoinnista löytyi suhteellisen vähän tietoa.

Valosähköiset paneelit ovat yksi käytetyimmistä ja kaupallisesti asemansa vakiinnuttaneista teknologioista [25], [26]. Valosähköiset paneelit yhdistävät jo toimivaksi osoitetun teknologian sekä tulevaisuuden parannusmahdollisuudet materiaalitekniikan sekä maksimitehopisteen seurannan osalta. [22], [27]

3.2.1 Lämpöenergia

Lämpösähköinen ilmiö perustuu sähkömotoriseen voimaan, joka muodostuu kahteen erilaiseen johteeseen, jotka ovat sähköisesti yhteydessä toisiinsa molemmista päistä ja päiden välillä on lämpötilaero. Ilmiö tunnetaan Seebeck -ilmiönä. Lämpötilaeron muodostamaa jännitettä kutsutaan lämpöjännitteeksi. Johteet muodostavat parin, jota kutsutaan lämpöpariksi. Lämpöparit ovat kytketty sähköisesti sarjaan, ja lämpötilaeron suhteen rinnan. [28] Kuvassa 3.3. on esitetty perinteisen lämpösähköisen elementin periaatekuva.



Kuva 3.3. Kuvassa esitetty perinteisen lämpösähköisen elementin periaatekuva. Kuvassa yläpuolella kuuma ja alapuolella kylmä pinta. Punainen palkki kuvaa p -tyypin puolijohdetta ja sininen n -tyypin puolijohdetta.

Kuvasta 3.3. nähdään yleisen lämpösähköisen elementin periaatteellinen rakenne. Lämpötilaero ($T_h - T_c$) muodostuu pintojen välille ja puolijohteiden läpi. N-tyypin puolijohhteissa muodostuu sähkökenttä, jonka suunta on kuumasta kylmään, eli kuumalla puolella elektronien tiheys on pienempi kuin kylmällä. P-tyypin puolijohhteissa kentän suunta on toisin päin, koska varauksen kuljettajat ovat aukkoja. Aukkojen tiheys kuumalla puolella on pienempi kuin kylmällä. P-tyypin ulostulossa kylmällä puolella aukkojen tiheys suurin, ja sen varaus on positiivinen. [28]

Lämpösähköisten elementtien hyvyttä tietyssä lämpötilassa mitataan ZT luvulla, ja se voidaan laskea yhtälöllä [29]

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa}, \quad (22)$$

missä α on Seebeckin kerroin (V/K), ρ on materiaalin lämmönjohtavuus (W/m*K), T on materiaalin absoluuttinen lämpötila (K), κ sähköistä resistiivisyyttä ($\Omega \cdot m$). Yhtälöstä huomataan että, mitä suurempi Seebeckin hyötysuhde on, sitä paremmin materiaali toimii lämpösähköisenä elementtinä. Lämmönjohtavuus elementin läpi pyrkii pienentämään pintojen välistä lämpötilaeroa, josta seuraa hyvysluvun heikkeneminen. Elementin sisä-

nen vastus pyrkii myös pienentämään hyvyyslukua. [30] Lämpötila on kerrottu molemmille puolille osoittamaan kyseisen materiaalin absoluuttinen lämpötila. [29] Systeemiä käsitellään lämpökoneena. Sen hyötysuhde η suhteutetaan ideaalisen Carnot'n lämpökoneen hyötysuhteeseen η_c . Hyötysuhde voidaan laskea yhtälöllä

$$\eta = \eta_c \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_c + T_h)} - 1}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_c + T_h) + \frac{T_c}{T_h}}}, \quad (23)$$

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (24)$$

missä T_h on kuuman puolen lämpötila ja T_c kylmän puolen lämpötila. [30]

$$\frac{1}{2}Z(T_h - T_c) = ZT, \quad (25)$$

missä lämpötila T on kuuman ja kylmän pinnan lämpötilojen keskiarvo. ZT :n arvo tietyssä lämpötilassa voidaan lukea materiaalille ominaisesta käyrästä. [29] Elementin tuottama avoimen piirin jännite U_{op} voidaan laskea yhtälöstä

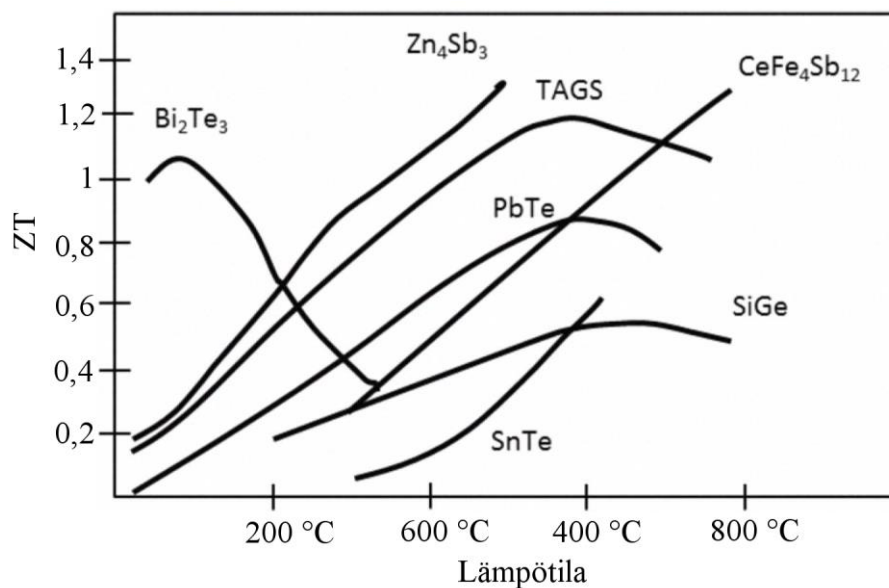
$$U_{op} = \alpha(T_h - T_c) \quad (26)$$

Avoimen piirin jännitteen avulla sekä lämpösähköisen elementin sisäisen resistanssin R_{TEG} avulla voidaan laskea maksimitehopiste P_{max} yhtälöllä [28]

$$P_{max} = \frac{U_{op}^2}{4R_{TEG}}. \quad (27)$$

On kuitenkin huomioitava, että maksimitehopiste riippuu lämpötilaeroista ($T_h - T_c$) sekä absoluuttisesta toiminta lämpötilasta T .

Elementtimateriaaleja ja valmistusmetodeja on monia. Yleisin käytetty materiaali on BiTe, jonka toimintalämpötila on 20–200 °C ja ZT arvo noin yksi. Kuvassa 3.4. on esitetty yleisten lämpösähköisten materiaalien ZT arvot lämpötilan funktiona.

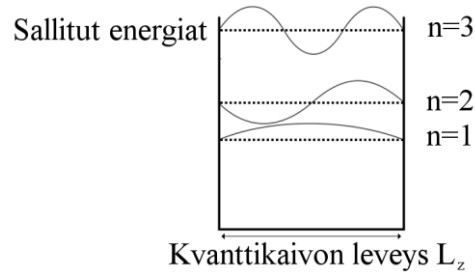


Kuva 3.4. Kuvassa esitetty lämpösähköisen elementin hyvyysluku ZT lämpötilan funktiona. [29]

Kuvasta huomataan, että optimaaliset käyttölämpötilat vaihtelevat huomattavasti riippuen käytetystä materiaalista. Käyttökohteita voi näin ollen olla monia. Kuitenkin hyötysuhteet jäävät materiaaleilla suhteellisen pieniksi. Kuvan 3.4. materiaalit edustavat josain määrin vanhentuvaa sukupolvea. [29]

Lämpösähköistä tekniikkaa voidaan pitää kilpailukykyisenä perinteisiin sähkötuo-
tuotantomenetelmiin, kun ZT saa suuremman arvon kuin 3 [31]. Tämän lisäksi valmistus-
kustannusten täytyy olla riittävän alhaiset. Ohutfilmeihin perustuvalla nanoteknologialla
on päästy huomattavasti vanhoja elementtejä parempiin ZT :n arvoihin. Ohutfilmentele-
menttien toiminta perustuu kvanttikaivoihin [30]. Kvanttikaivo on tietynlainen heterora-
kenne, jossa kapeaa kaivokerrosta ympäröi kaksi reunakerrosta. Sekä elektronit että aukot
näkevät kaivossa alemman energiatason. Kaivokerros, johon elektronit sekä aukot ovat
vangittuina, on tyypillisesti noin 100 Ångstromin eli 10 nm paksuinen. Kerros on niin
kapea, että elektronien sekä aukkojen aaltoluonne on merkitsevä. Tästä seuraa, että sallit-
ut tilat kaivossa ovat seisovia aaltoja kohtisuorassa kerrokseen nähden. Koska vain tietyt
seisovat aallot ovat sallittuja, systeemi on kvanttittunut. Kerrosmateriaalien valinnassa on
tärkeää, että kerrosten materiaalien hilarakenteet ovat mahdollisimman yhtenevät. Jos
näin ei ole, kasvatettujen kerroksien kristallirakenteet eivät sovi toisiinsa.

Kuvassa 3.5. on äärettömän kvanttikaivon periaatekuva. Kaivo on oletettu äärettömäksi,
tilanteen yksinkertaistamiseksi ja toimintaperiaatteen esityksen johdosta. Oletus aiheuttaa
kaivon reunojen äärettömän korkeuden, jolloin aaltoyhtälöstä täytyy tulla nolla kaivon
reunojen kohdalla. Kuvasta näkyy kvanttikaivon sallitut energiatilat E_n sekä kvanttikai-
von



Kuva 3.5. Kuvassa havainnollistettu äärettömän kvanttikaivon toimintaperiaatetta.

Äärettömän kvanttikaivon energiatilat voidaan laskea yhtälöllä

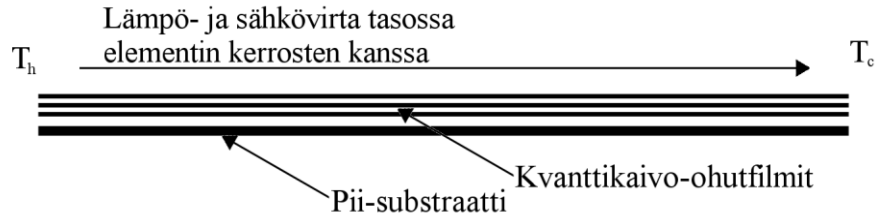
$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{n\pi}{L_z} \right]^2, n = 1, 2, \dots, \quad (28)$$

missä \hbar on redusoitu Planckin vakio, m on hiukkasen efektiivinen massa, L_z on kvanttikaivon leveys. Sallittujen energiatilojen aaltoyhtälöt ϕ_n z - suunnassa voidaan muodostaa yhtälöllä

$$\phi_n = A \sin\left(\frac{n\pi z}{L_z}\right), n = 1, 2, \dots, \quad (29)$$

missä A on amplitudi. Kvanttikaivot siirtävät kaikki elektronit, joiden energia ylittää kaivon energiatason. Elektronit pystyvät liikkumaan kaivoissa vain kahden akselin suuntaisesti. Vaihtoehtoinen nanotekniikkaan perustuva teknologia käyttää hyväkseen kvanttipisteitä. Kvanttipisteet pystyvät siirtämään vain tietyn energiatason omaavia elektroneja. Lämpösähköisissä sovelluksissa kvanttikaivoihin perustuva teknologia on [32] mukaan perusteltua seuraavista syistä: Kvanttikaivot pystyvät siirtämään kvanttipistemateriaaleja suurempia virtoja, koska elektronien liike ei ole rajoitettua poikittaissuunnassa. Kaivon läpäisevien elektronien taajuusalue on suuri. Lisäksi kapeista kvanttikaivoista seuraa suuret energiatasojen erot. Tästä johtuen valmistetut elementit soveltuvat hyvin huoneenlämpötilassa käytettyihin sovelluksiin. [32], [33]

Jovanovic et al. [30] esittelee tekniikan, jossa on vuorotellaan 10 nm paksuisia kerroksia piitä (Si) sekä pii-germaniumia ($\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$). Kerrokset on muodostettu magnetroni sputteroinnilla, jotta saadaan muodostettua yhtenäinen kerros. Valmistetun elementin $ZT > 5$ ja huoneenlämmössä $ZT \sim 3$ ($T_c = 26^\circ\text{C}$ ja $T_h = 66^\circ\text{C}$), joka viittaisi kaupallisen kilpailukyvyyn mahdolliseen toteutumiseen. Elementin testauksessa käytettiin lämpövanhennusta, joka ei aiheuttanut sähkötehon alenemista testijakson jälkeen. Viileä ja kylmä pää asetetaan elementin päihin pituussuunnassa, jolloin lämpö- ja sähkövirta muodostuvat kerrosten tason suunnassa Kuvassa 3.6. on esitetty elementin periaatteellinen rakenne.



Kuva 3.6. Kuvassa esitetty kvanttikaivoihin perustuvan lämpösähköisen elementin periaatteellinen rakenne kuva. Lämpö sekä sähkövirta ovat tasossa kerrosten kanssa. Elementin päissä on kuuma T_h ja kylmä puoli T_c

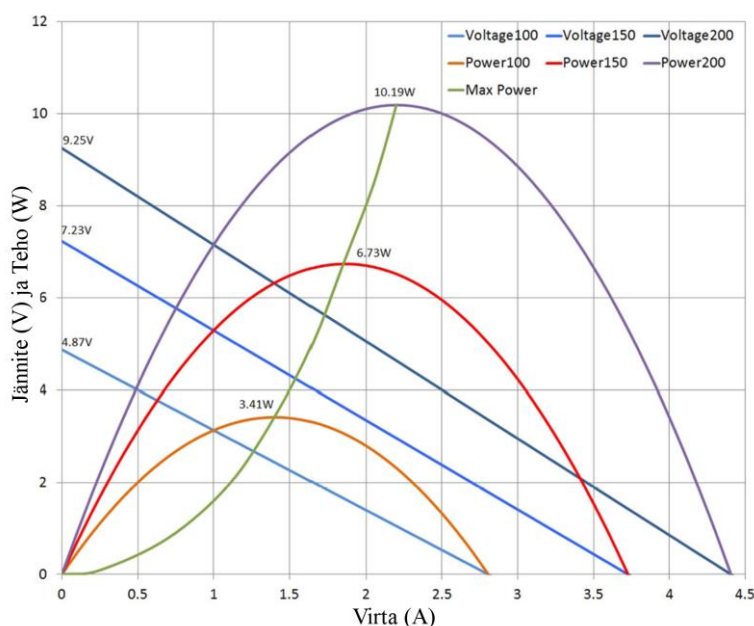
Vaihtoehtoisesti lämpö- ja sähkövirta voidaan muodostaa kohtisuoraan kerrosten tasoon nähden, jolloin lämpövirta pienenee, mutta kvanttikaivoefektiä ei havaita. Kvanttikai-voelementtien materiaalikustannukset ovat pienemmät kuin massasta valmistettujen. Kustannukset pienenevät edelleen, jos sputterointi tehdään kaptonille piin sijasta. Vaikka kvanttikaivomateriaalien valmistus laboratorio-olosuhteissa on hidasta ja kallista, laaja tuotanto on mahdollista kaupallisilla sputterointilaitteilla, jolloin valmistuskustannukset pienenevät huomattavasti. Ennustettu hinta on alle yksi dollari wattia kohden, joka on verrannollinen valosähköisten paneelien hintaan.

Lämpösähköisten elementtien maksimitehopisteen seuranta on hyödyllistä ottaa huomioon. Maksimitehopisteen seuranta tarkoittaa, että tehollähteen näkemä kuormaresistanssi on sovitettu lähteen sisäiseen resistanssiin. Työn tekohetkellä kvanttikaivojen sisäisen resistanssin käyttäytymisestä eri olosuhteissa ei löytynyt tietoa, joten seuraavaksi esiteltävä MPP-seurannan ei voida sanoa pätevän siihen. Esimerkkinä julkaisuissa käytettiin usein perinteistä Bi_2Te_3 elementtiä, jonka jännite- ja virtakäyttäytyminen eri lämpötiloissa ovat lineaarisia ja sisäinen resistanssi pysyy samana. Tästä seuraa, että jännite ja virta maksimitehopisteessä voidaan laskea yksinkertaisesti yhtälöistä

$$V_{mp} = \frac{V_{oc}}{2}, \quad (30)$$

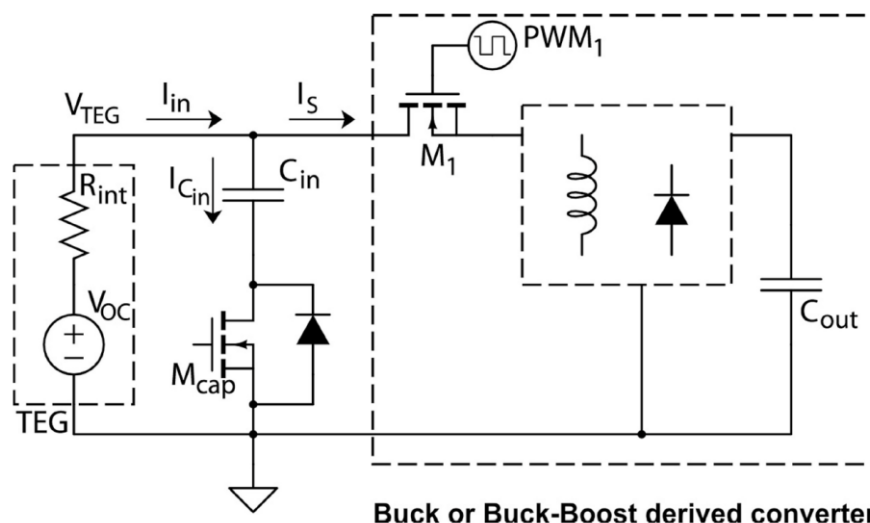
$$I_{mp} = \frac{I_{sc}}{2}, \quad (31)$$

missä V_{mp} on jännite maksimitehopisteessä, V_{oc} on avoimen piirin jännite, I_{mp} on virta maksimitehopisteessä, I_{sc} on piirin oikosulkuvirta. Montecuco et al. [34] testasivat ja valmistivat avoimen piirin jännitteen mittaukseen perustuvan maksimitehopisteen seuranta-piirin. Kuvassa 3.7. on käytetyn lämpösähköelementin jännitteen ja virran käyrät, sekä tehojen käyrät eri lämpötiloilla.



Kuva 3.7. Kuvassa esitetty lämpösähköisen elementin käyrämuodot jännitteelle, virralle, teholle ja maksimiteholle eri lämpötilaeroilla ΔT (100 °C, 150 °C, 200 °C). Käytetty elementti on European Thermodynamics Ltd:n valmistama GM250-127-14-10. [35]

Kuvasta voidaan huomata jännitteen ja virran lineaarisuus eri lämpötiloilla. Maksimitehopisteen seuranta on toteutettu seuraamalla oikosulkujännitteen puolikasta ja asettamalla sama jännite kuorman ylitse. Esimerkin maksimitehopisteen seurantapiiri on esitetty kuvassa 3.8. Mittausjaksolla PWM₁ t_{off} aikana lämpösähköinen elementti on hetkellisesti kytketty irti piiristä. Elementin oikosulkujännite ehditään mittaamaan DC-DC muuntimen kytkentätaajuuden välissä t_{off} aikana, koska lämpösähköisen elementin jännite nousee oikosulkujännitteen V_{oc} korkuiseksi tyypillisesti muutamissa kymmenissä nanosekunnissa. Kytkentätilanteet t_{on} sekä t_{off} viittaavat kuvassa 3.8. esitettyyn PWM₁ pulssisuhteeseen. M_{cap} on normaalitoiminnan aikana kiinni ja avautuu mittausjakson aikana. Kondensaattori C_{in} osallistuu muuntimen tarvitseman pulssimuotoisen virran syöttöön t_{on} jakson aikana. Kun mittausjakso alkaa M_{cap} avataan ja V_{oc} mitataan t_{off} aikana elementin napojen ylitse (tämä ei näy kuvassa).



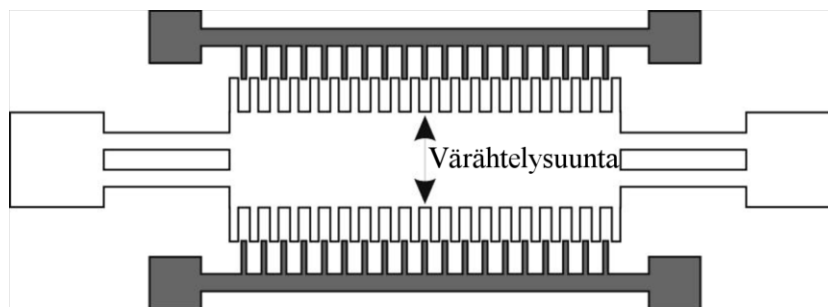
Kuva 3.8. Kuvassa esitetty esimerkkiin valmistetun piirin kaaviokuva.

Mittausjaksojen taajuus suhteutetaan lämpötilan muutosnopeuteen, joka on käytännön kokemukseen perustuen yleensä 0,1 ja 1 sekunnin välissä. Tyypillisesti V_{oc} mitataan C_{in} kondensaattorin ylitse, mutta tällöin on odotettava, että kondensaattorin jännite ehtii nousta oikosulkujännitteen arvoon. Esimerkissä käytettiin myös diodi-kondensaattori-diodi vaimennusta elementin ja piirin välissä, koska kytkentätilanteessa t_{off} syntyy elementin parasiittisesta induktanssista johtuvia transientteja. Transientit resonoivat piirin parasiittisten kapasitanssien kanssa. [34], [35]

3.2.2 Mikrosähkömekaaninen energia (MEMS)

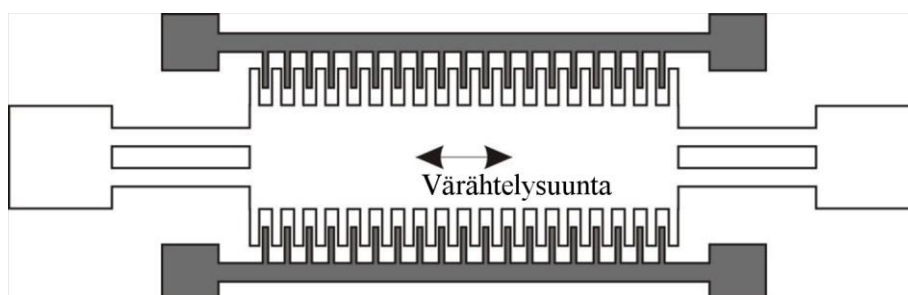
Mikrosähkömekaanisella energian keräämisellä tarkoitetaan energian keräämistä liikkeestä. Teknologiat voidaan jakaa tuotantomuotojensa perusteella kolmeen ryhmään: pietsosähköiseen, sähkömagneettiseen ja sähköstaattiseen. [36]

Sähköstaattiset keräimet ovat useimmiten kamparakenteisia värähtelijöitä. Kuvassa 3.9. on esitetty lomittuvan sähköstaattisen generaattorin periaatekuva. Värähtelijän piikit lomittuvat pintojen piikkien kanssa, näin saadaan kasvatettua pinta-alan muutosta värähtelyn aikana. Energian keruu perustuu kapasitanssin muutokseen tasaisessa sähkökentässä. Kenttä voidaan luoda aktiivisesti teholähteestä, kuten paristosta, tai hyödyntää materiaaleja, joissa sähkökenttä esiintyy luonnostaan. Piihin on mahdollista muodostaa pysyvä sähkökenttä, lisäämällä siihen kerroksia piioksidia ja piinitridiä, ja asettamalla se suureen ulkoiseen sähkökenttään. Piin nitridikerrokseen syntyvä kenttä on samansuuntainen ulkoisen kentän kanssa. Pii lämpökäsitellään, jolloin sähköinen rakenne lujittuu. Uusi rakenne on pysyvä normaaliolosuhteissa noin 50 vuotta. Kolmas tapa tuottaa sähkökenttä generaattorin elektrodien on käyttää varauspumppua. Luodun sähkökentän voimakkuus vaikuttaa suoraan tuotettuun energiaan. [37]



Kuva 3.9. Lomittuvan sähköstaattisen generaattorin periaatekuva. Liikesuunta on osoitettu nuolilla [38].

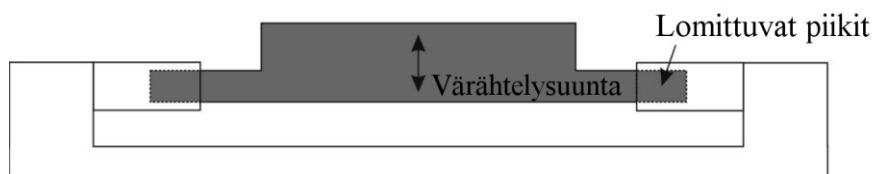
Liike aiheuttaa piikkien lomittumista, jolloin kapasitanssi muuttuu. Värähtelijän liikettä pitää rajoittaa mekaanisilla rajoilla, jotta se ei vahingoitu iskuissa tai jää kiinni vastakapaleeseen. Tämä tarkoittaa, että rajoilla säädetään myös systeemin maksimikapasitanssia. Värähtelijän liike on tasossa elektrodien kanssa ja kohtisuorassa värähtelijän akseliin. Tämä mahdollistaa myös kiertyvän värähtelyn, jolloin värähtelijän akselin toinen pää liikkuu vastakkaiseen suuntaan kuin toinen. Kiertyvässä värähtelyssä on oikosulkujen sekä värähtelijän tarttumisen mahdollisuus, jos elektrodien piikit koskettavat. Generaattori voidaan valmistaa myös siten, että värähtelijän liikerata on tasossa elektrodien kanssa ja akselin suuntainen. Kuvassa 3.10. on esitetty tällainen rakenne.



Kuva 3.10 Sähköstaattisen generaattorin periaatekuva. Liikerata on osoitettu nuolilla (värähtelijän akselin suuntainen) [38].

Värähtelijän, jonka liikerata on sen akselin suuntainen ja tasossa rungon kanssa, liikerata on helpommin hallittavissa, mutta kapasitanssin muutos yhdessä värähdyksessä ei ole suhteessa yhtä suuri, kuin kuvan 3.9. mukaisella rakenteella toteutetussa generaattorissa. Akselin suuntaisella, tasossa rungon kanssa värähtelevällä generaattorilla on toteutettu systeemi, joka tuotti $116 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ kiihtyvyydellä $2.25\text{m}/\text{s}^2$ 120Hz :n taajuudella.

Värähtelijä voi värähdellä myös kolmannella akselilla, kohtisuoraan rungon elektrodien tasoon ja värähtelijän akseliin nähden. Kuvassa 3.11. on esitetty tällainen rakenne.

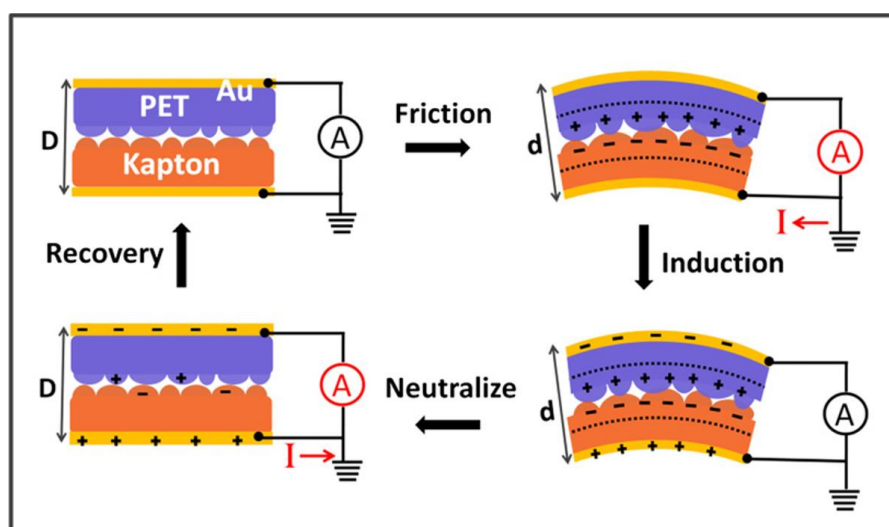


Kuva 3.11. Sähköstaattisen generaattorin periaatekuva. Värähtelijän liikerata on osoitettu nuolilla. [38]

Kohtisuoraan tasoon nähden toimivan värähtelijän toimintaan vaikuttaa huomattavasti ohutfilmivaimennus (thin film damping). Lisäksi värähtelijän piikit voivat tarttua seinämien piikkeihin [37]. Ohutfilmivaimennusta tapahtuu, kun pintojen etäisyydet pienenevät riittävästi. Lähekkäisten pintojen välisen ilmakerroksen paine kasvaa, ja vastustaa värähtelijän liikettä [39]. Tehon nostamiseksi generaattori pitäisi pakata tyhjiöön, jolloin ilmakerrosta ei olisi [37].

Pienillä alle neliösenttimetrin värähtelijöillä värähtelytaajuus kasvaa nopeasti useista sadoista hertseistä kilohertseihin. Värähtelyn resonanssitaajuuteen voidaan vaikuttaa esimerkiksi värähtelijän massalla tai tekemällä siitä kaksoisresonanssinen. Tällä tavalla voidaan saavuttaa resonanssitaajuuksia 20–40 Hz:llä. Kaksoisresonanssin muodostamiseksi systeemissä on kaksi värähtelijää. Generaattori on esimerkiksi kuvan 3.11. mukainen värähtelijä, jolla on luontaisesti korkea resonanssitaajuus. Sen rinnalla on nurjahduslevyjen varaan ripustettu massa eli toisioresonaattori. Toisioresonaattorin tarkoitus on käynnistää generaattorin värähtelijä. Toisioresonaattorin resonanssitaajuutta voidaan muuttaa säätämällä nurjahduslevyjen pituutta. Kun systeemi värähtelee matalilla taajuuksilla, käynnistysmassa siirtyy nurjahduslevyjen ansiosta kahden pysyvän tilan välillä. Tilan muutoksesta syntynyt liike-energia siirtyy generaattorin värähtelijään generaattorin rakenteita pitkin ja aiheuttaa siinä resonanssitaajuisen värähtelyn. [40]

Sähköstaattisiin generaattoreihin lukeutuu myös hankaussähköön perustuvat generaattorit TEG:it (triboelectric generator). Generaattorin tyypillinen rakenne on kuvattuna kuvassa 3.12.

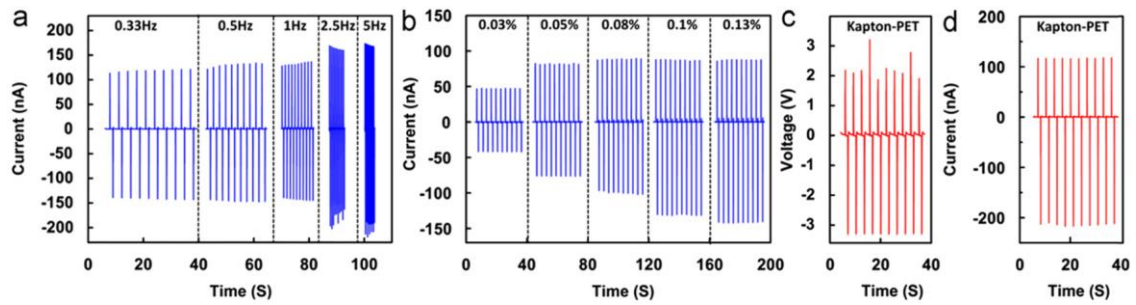


Kuva 3.12. TEG:n rakenteen ja toiminnan periaatekuva. [24]

Generaattori koostuu kahdesta kerrostetusta eristeestä, kuten kapton ja PET polymeereistä. Polymeerien ulkopinnoilla on johteet, jotka kuljettavat varaukset kuorman läpi. Kuvassa 3.12. on esitetty generaattorin toimintaperiaate. Lepotilassa varausta ei synny. Pintojen hangatessa toisiaan vasten puristavassa, vääntävässä tai liukuvassa liikkeessä eristekeroksien sisäpinnoille muodostuu vastakkaiset varaukset kitkan vaikutuksesta. Pinnat näyttävät sileiltä ja kiiltäviltä, mutta nanotasolla tarkasteltuna ne ovat karkeita. Tästä syystä hankaavat pinta-alat ovat huomattavasti suuremmat, kuin silmämääräisesti tarkasteltuna näyttää. PET – kerroksen sisäpinta varautuu positiivisesti ja kapton kerroksen sisäpinta negatiivisesti. Eristeisiin muodostuu dipolikerros polymeerin ulko ja sisäpinnan väliin. Kuvassa 3.12. tämä on esitetty katkoviivalla. Varaukset eivät pääse purkautumaan polymeerin läpi sen eristävän luonteen takia. Tällöin syntyy jännite polymeerien pinnoilla olevien johteiden välille, ja potentiaali pyrkii purkautumaan kuorman kautta. Lisäksi kerrosten mekaaninen puristus johtaa pieneen kerrosten välisen etäisyyden muutokseen, joka johtaa systeemin kapasitanssin C muutokseen. Kuvassa 3.12. tämä on esitetty siirtymänä D :stä d :hen. Tällöin virta I saa yhtälön

$$I = C \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (32)$$

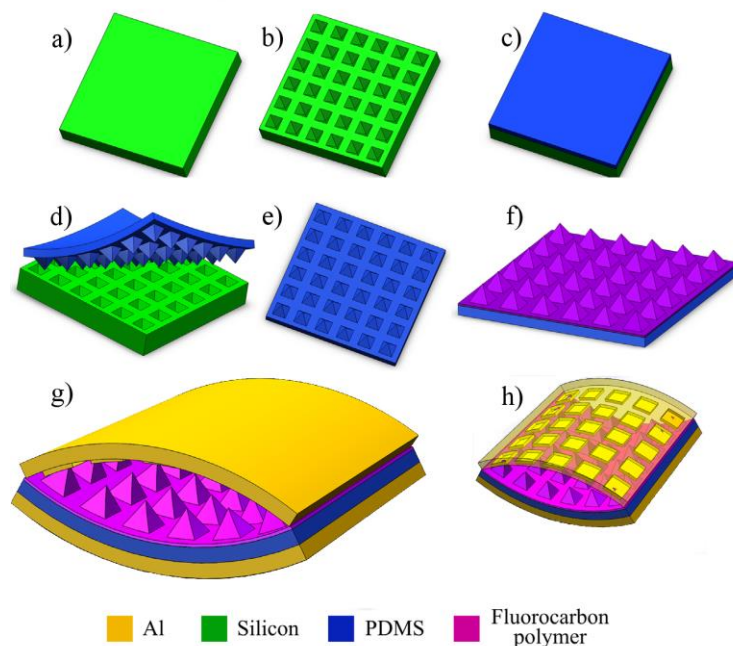
missä $\frac{\partial V}{\partial t}$ kuvaa jännitteen muutosta elektrodien välillä, johtuen staattisesti syntyneistä varauksista ja $\frac{\partial C}{\partial t}$ kuvaa kapasitanssin muutosta, kun PET- ja kapton-kerrosten etäisyys muuttui mekaanisen puristuksen johdosta. Kun hankauksen aiheuttanut voima poistetaan ja generaattori palaa alkuperäiseen muotoonsa, hankauksesta kerrokseen syntyneet varaukset pääsevät purkautumaan. Tällöin syntyy vastakkaisuuntainen virta. Prosessi on vastaavanlainen kuin pietsosähköisessä systeemissä, mutta potentiaalin synty tapa on eri. Varauksilla voidaan ladata esimerkiksi kondensaattoria tasasuuntauksen jälkeen. Esimerkkinä kuvan 3.12. rakenteen mukainen, 4,5 cm * 1,2 cm kokoinen systeemi, jonka eristekerroksina on 125 µm paksuinen kapton filmi ja 220 µm PET filmi. Generaattorin kapeat reunat kiinnitettiin toisiinsa teipillä, ja pitkä sivu jäi avoimeksi. Filmien pinnat päällystettiin 100 µm paksulla kultakerroksella, joka muodostettiin sputteroimalla. Generaattoria käytettiin lineaarimoottorilla, joka vuoroin väänsi ja suoristi kappaletta eri taajuuksilla. Kuvassa 3.13 on esitetty syntyneet virran ja jännitteen käyrämuodot eri taajuuksilla [24]



Kuva 3.13. Esimerkki generaattorin virta- ja jännitemuodot eri värähdystaajuuksilla a) ja mekaanisilla jännityksillä b). Generaattorin virta eri mekaanisilla jännityksillä. c) Kapton-PET generaattorin jännite ja d) virta. [24]

Kuvan 3.13. c) ja d) kohdista on laskettu maksimitehoitehoisuus $\sim 10 \text{ mW/cm}^3$, kun virta on $0,6 \mu\text{A}$ ja jännite $3,3 \text{ V}$. Generaattoreita voidaan kytkeä rinnan, jolloin virrat summautuvat. Jos generaattorit kytketään rinnan, mutta eri päin, virrat kumoavat toisensa. Generaattorin suurimpana etuna on sen matala mutta laaja toimintataajuus. Generaattori pystyy tuottamaan energiaa hyvin pienellä taajuudella tapahtuvasta liikkeestä, kuten esimerkiksi kävelystä ja tuulesta [24]. TEG:n hyötysuhde on verrannollinen hankaaviin pinta-aloihin, joten niiden maksimointi on seuraava järkevä kehityssaskel.

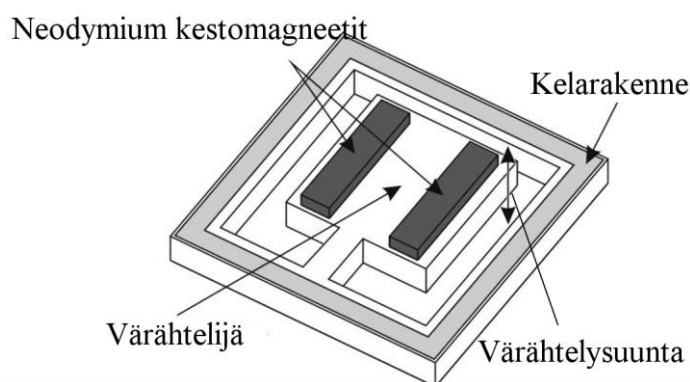
Nanoteknologialla on mahdollista kasvattaa kontaktipinta-aloja mikro ja nanoskaalassa. Hankaussähköön perustuvilla nanogeneraattoreilla on saatu huomattavia tehoja aikaan pienistä TENG (triboelectric nanogenerator) laitteista $4,85 \text{ mW/cm}^2$, jossa huippujännite on 265 V ja virrantiheys $18,3 \mu\text{A/cm}^2$. Nanorakenteet on muodostettu piille fotolitografian ja kaliumhydroksidi etsauksen avulla. Kuvassa 3.14. on esitetty TENG:n periaatteellinen rakenne. Kuvaan on merkattu käytetyt materiaalit eri värein.



Kuva 3.14. TENG:n periaatteellinen rakenne. Käytetyt materiaalit on esitetty eri värein. [41]

Pii toimii muottina PDMS kalvolle. Piille nanorakenteet on muodostettu fotolitografialla ja kalium hydroksidilla (KOH) etsaamalla (kuva 3.14 a-e). PDMS-kalvo on käsitelty käyttämällä oktafluorisyklobutaani (C_4F_8) plasmakäsittelyä (kuva 3.14. f). PDMS-kalvon pintakäsittely parantaa generaattorin hyötysuhdetta huomattavasti. Generaattorin runkona ja napoina toimivat kaarevat alumiinilevyt (kuva 3.14. g ja h). [41]

Sähkömagneettinen generaattori koostuu usein kestopagneeteista ja keloista, jotka liikkuvat suhteessa toisiinsa. Rakenteita voi olla monenlaisia. Värähtelijä voi olla magneetti tai kela. Magneettivärähtelijä on ripustettu kelarakenteen sisään tai sen läheisyyteen ja kela värähtelijä värähtelee kestopagneetin luodun magneettikentän sisällä. Tärkeintä on, että magneettivuo lävistää kelan ja kela näkee muuttuvan magneettikentän värähtelyn aikana. Kelan näkemä muuttuva magneettikenttä indusoi kelaan sähkömotorisen voiman, joka aiheuttaa siihen virran. Kuvassa 3.15. on esitetty magneettivärähtelijällä toteutetun generaattorin periaatekuva. Värähtelijän liikerata on esitetty nuolilla. [37]

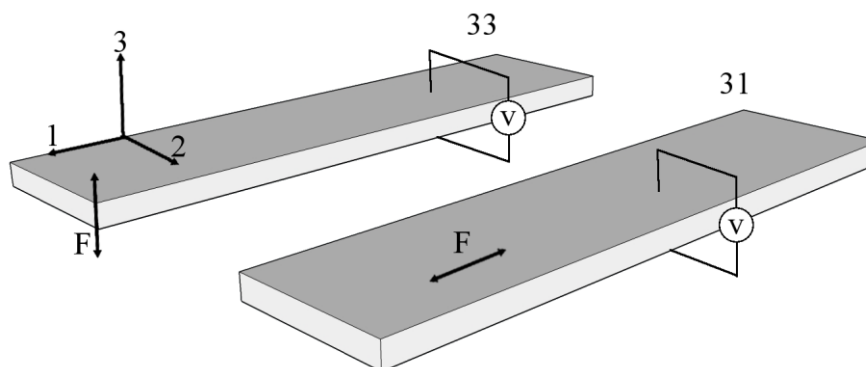


Kuva 3.15. Sähkömagneettisen generaattorin periaatekuva. Magneetit sijaitsevat värähtelijässä, jonka liikerata on kohtisuora tasoon nähden [37].

Kuvan mukainen rakenne voidaan tehdä esimerkiksi pii-levylle, jonka reunoille etsattu kelalle kanava. Pii pohjainen värähtelijän varsi on suositellumpi, kuin polymeerinen. Polymeereillä on suuremmat mekaaniset häviöt. Lisäksi ne eivät jäykisty suurilla värähtelyn amplitudeilla, kuten pii. Polymeereillä, kuten kapton, on kuitenkin mahdollista rakentaa matalammilla taajuuksilla värähteleviä generaattoreita. Pii-varrellisen generaattorin resonanssitaajuus on suhteellisen korkea 6,4–12,6 kHz, mutta tuottaa tehoa myös alemmilla 30–350 Hz:n käyttötaajuuksilla. [37]

Pietsosähköisissä generaattoreissa on aktiivisissa osissa kiderakenne, jota kuormitetaan värähtelyllä. Kuormitus aiheuttaa materiaalissa sähköisen polarisoitumisen, mikä on havaittavissa jännitteenä kiteen vastakkaisten pintojen välillä. Taasen, jos ulkoisesta jännitelähteestä asetetaan muuttuva jännite generaattorin napoihin, niin kiderakenne alkaa värähdellä. [42]

Pietsosähköisillä systeemeillä on monia eri värähtelymoodeja. Värähtelymoodi riippuu muodostuvan jännitteen suunnasta suhteessa generaattoriin kohdistuvaan voimaan. Generaattorisovelluksissa käytetyimmät moodit ovat 33 ja 31. Kuvassa 3.16. on havainnollistettu värähtelijään vaikuttava voima suhteessa jännitteen orientaatioon edellä mainituilla moodeilla. Ensimmäinen numero on jännitteen muodostumisakseli ja toinen numero on voiman suunnan akseli. Kuvassa vaikuttava voima on merkattu F :lla



Kuva 3.16. Pietsosähköisen elementin yleisimmät toimintamoodit mikrogenaattori käytössä [43 s.7].

Moodia 33 käyttävät kerrostetut systeemit (stack actuators), joissa voima on samansuuntainen, kuin tuotettu jännite. Bimorfiset elementit toimivat moodilla 33, jossa voima vaikuttaa kohtisuorasti suhteessa muodostuvaan jännitteeseen nähden. Yleisin generaattorimalli on varsivärähtelijä (cantilever generator), kuten kuvassa 3.16. Värähtelijän vapaaseen päähän voidaan kiinnittää paino. Painolla voidaan säätää värähtelijän resonanssitaajuutta [43 s. 3-7].

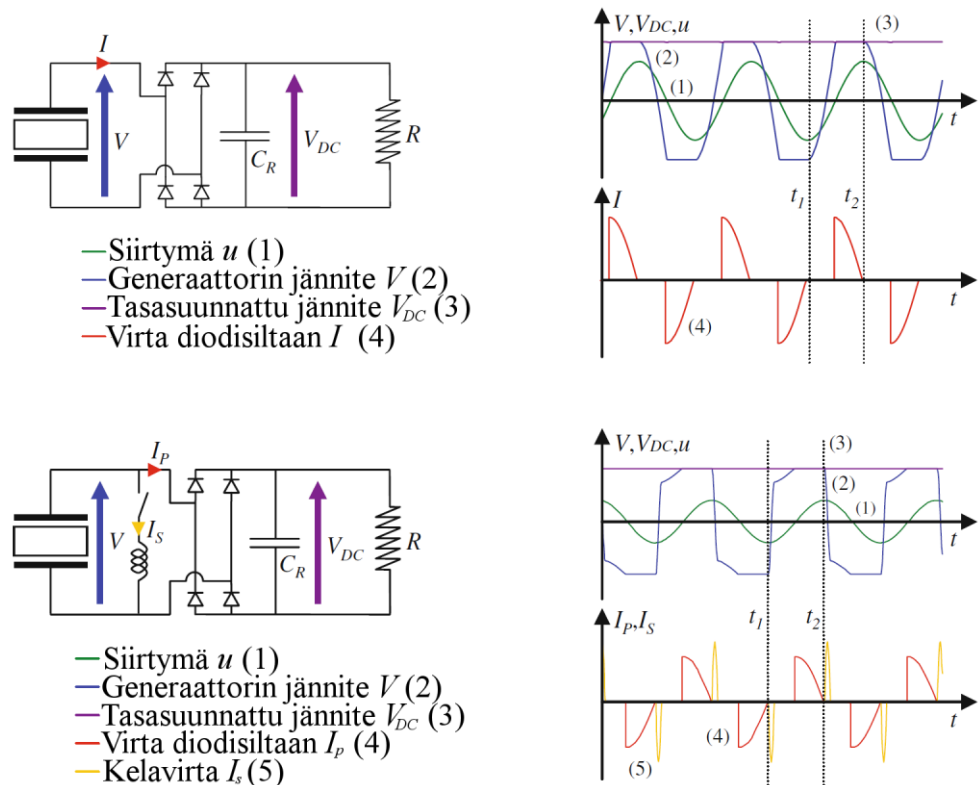
Generaattorin muodostama jännite on AC-muotoista, ja taajuus on sama kuin generaattorin värähtelytaajuus. Jotta energiaa saadaan kerättyä talteen, täytyy ulostuloa ohjata. Yksinkertaisin tapa on tasasuunnata vaihtovirta diodisillalla, jonka rinnalle on kytketty suodatinkondensaattori. Kondensaattorin jälkeen on usein DC-DC-muunnin, joka syöttää piiriä. DC-DC-muuntajalla voidaan säätää generaattorista otetun jännitteen ja virran suhdetta, jotta saatua tehoa voidaan optimoida. Jos DC-DC-muunnin jätetään pois, generaattori näkee kondensaattorin muodostaman vastajännitteen. Tällöin kondensaattori ei lataudu, ellei generaattorin tasasuunnattu jännite ylitä kondensaattorin varauksen muodostamaa jännitettä (kuva 3.17. ylhäällä). Rinnalle voidaan kytkeä paristo tai suurempi kondensaattori toimimaan energiavarastona. [43 s. 209-210] Paristoa käytettäessä täytyy ottaa huomioon mahdollinen latauksen ohjaus.

Pietsoelementin värähtelystä saatu energian maksimointi voidaan toteuttaa epälineaarilla ohjauksella. Ohjaus perustuu elementin rinnalle asennettuun kytkinlaitteeseen. Kytkinlaite vääristää generaattorin muodostaman jännitteen lähelle kanttiaaltoja, jonka taajuus on tahdissa generaattorin kokeman mekaanisen siirtymän derivaatan kanssa. Eli kytkentä muuttuu, kun pietsoelementin siirtymä on maksimissa tai minimissä.

Tästä seuraa huomattava energiantuotannon kasvu ja värähtelyn vaimeneminen varsinkin resonanssitaajuuksilla. Mahdollisia piirimalleja on erilaisia, joista esitellään tässä työssä kaksi SSHI (synchronized switch harvesting on inductor) sekä SECE (synchronous electric charge extraction) [43 s. 211-222]

Epälineaarinen ohjaus voidaan toteuttaa generaattorin kanssa rinnan sarjaan kytkeydyllä kytkimellä ja kelalla, eli SSHI – tekniikalla. Toinen tapa on kytkeä kela-kytkin - pari generaattorin kanssa sarjaan. Sarja-SSHI – tekniikan etu on energian tuotto pienemmillä kuormajännitteillä. Haittapuolena on pienempi tehon tuottopotentiaali. Työssä on esitelty rinnankytkentä tarkemmin.

Kytkin sulkeutuu aina värähtelijän ollessa ääriasennossa. Jännitteen amplitudi kasvaa jatkuvasti, jos piiri on avoin. Kuvassa 3.17. on havainnollistettu perinteisen tasasuuntaajalla ja suodatinkondensaattorilla toteutetun piirin kytkentä ja toiminta, sekä SSHI tekniikalla toteutetun piirin kytkentä ja toiminta. Tasasuuntaus on esimerkissä oletettu ideaaliseksi.

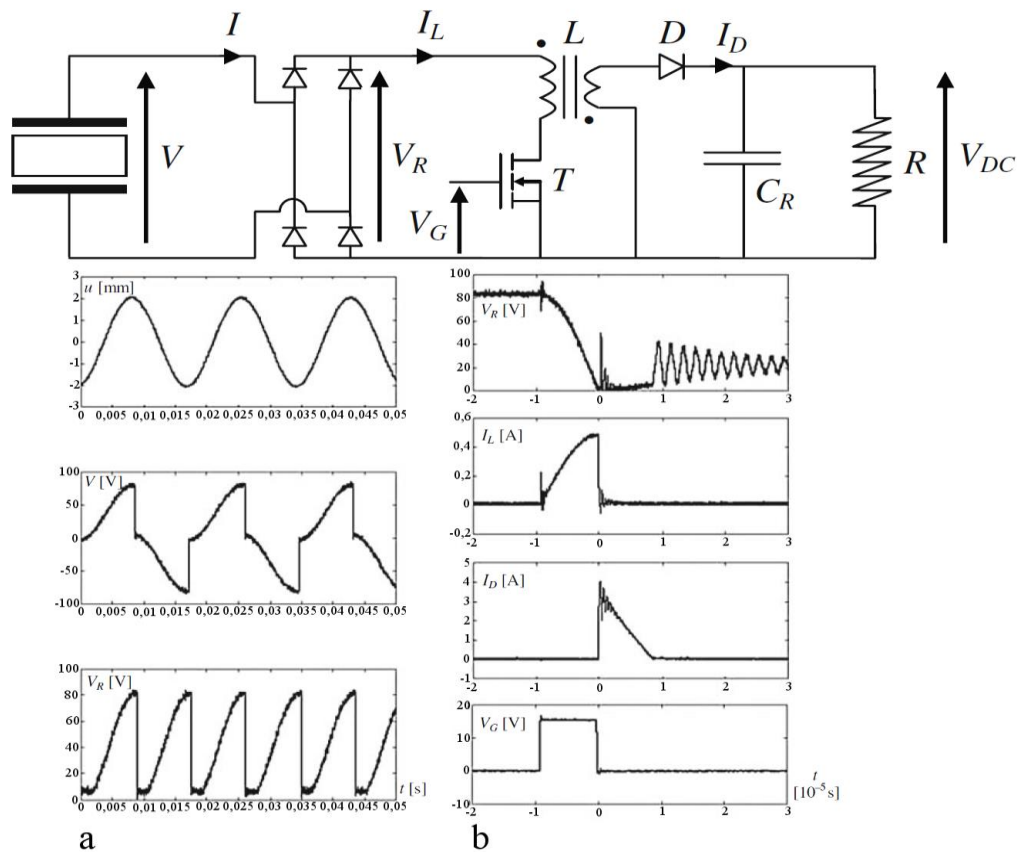


Kuva 3.17. Ylhäällä tasasuuntaajalla ja suodatinkondensaattorilla toteutetun pietsogeneraattorin piiri käyrämuotoineen. Alhaalla SSHI – tekniikalla toteutetun pietsogeneraattorin piiri käyrämuotoineen [43 s.222-223]

Kuvan 3.17. ylemmän piirin käyrämuodoista huomataan, että niin kauan kun generaattorin jännitteen itseisarvo $|V|$ on pienempi kuin tasasuunnattu jännite V_{DC} , diodisilta ei johda, ja jännite on verrannollinen siirtymään u . Kun V_{DC} jännite saavutetaan, alkaa diodisilta johtamaan ja jännite $|V|$ lopettaa kasvun. Kuvan 3.17. alemmassa piirissä on SSHI-

tekniikalla toteutettu piiri. Piirin käyrämuodoista huomataan, että kun generaattorin jännitteen itseisarvo $|V|$ on pienempi kuin tasasuunnattu jännite V_{DC} , diodisillan virta I_p on nolla ja jännitteen arvo on verrannollinen siirtymään u . Kun jännite $|V|$ kasvaa jännitteen V_{DC} suuruiseksi, sen kasvu pysähtyy ja diodisilta alkaa johtamaan. Diodisillan virta pienenee nollaan, kun siirtymän derivaatta du/dt on nolla, eli se on saavuttanut maksiminsa tai miniminsä. Tällöin kytkin sulkeutuu, ja generaattorin jännite kääntyy päinvastaiseksi hyvin nopeasti. Käyristä tämä huomataan kelavirtana I_s ajanhetkillä t_1 ja t_2 . Tehon siirron maksimoimiseksi on otettava huomioon kuorman optimointi. Häviöitä aiheutuu pietso-generaattorin kapasitanssista, koska koko pietsoelementin varaus ei ole purkautunut, kun kela kytketään. Tästä seuraa virta takaisin generaattoriin. Lisäksi osa häviöistä syntyy jännitteen aiheuttamasta mekaanisesta vaimennuksesta. [43 s.222-223], [44].

Toinen epälineaarinen ohjaustapa on synkroninen sähkövarauksen keräys, eli SECE. Kytkimen toiminta on vastaava kuin aikaisemmin esitellyssä SSHI piirimallissa. Kytkentä tapahtuu, kun siirtymä on ääriasennossa. Kuvassa 3.18. on esitetty flyback-muuntimella toteutettu SECE-piiri ja siihen liittyvät jännitteen ja virran käyrämuodot. SECE-piiri voidaan toteuttaa myös esimerkiksi buckboost-muuntimella [43 s. 254-262].



Kuva 3.18. Flyback-muuntimella toteutettu SECE-piiri sekä jännitteen ja virran käyrämuodot piirissä [43 s.261]

Kuvassa a puolella on kuormittamattoman generaattorin käyrämuodot ja b puolella käyrämuodot, kun transistori T on johtavassa tilassa. Tilanteiden a ja b erona huomataan V_R

käyrämuodon muuttuminen. Muunninta ohjataan transistorin T jännitteellä V_G . Kun jännite V_R nousee riittävän korkeaksi, transistori sulkeutuu ja kela L kytkeytyy piiriin ajanhetkellä $-1 \cdot 10^{-5}$ s suhteessa transistorin avautumiseen. Kelan latautuminen nähdään kelan virrasta I_L . Jännitteen V_G raja-arvo on määritelty siten, että transistori siirtyy johtavaan tilaan aina, kun diodisillan jännite V_R saavuttaa maksiminsa (kuvan 3.18. a puolella). Tämä tarkoittaa, että piiri pystyy säätämään itseään aktiivisesti. Ohjauspiiri siirtää transistorin takaisin johtamattomaan tilaan, kun generaattorin jännite V_G laskee nolleen. Diodisillan jännite seuraa generaattorin jännitteen käyrämuotoa $|V|$. Generaattorin jännite V seuraa elementin poikkeaman u käyrämuotoa aina siihen pisteeseen, jolloin poikkeama saavuttaa maksimin tai minimin, josta seuraa jännitteen napaisuuden vaihtuminen. Transistorin avautumisen jälkeen kelan L energia purkautuu takaiskudiodin D kautta kondensaattoriin C_R . Tämä nähdään diodivirrasta I_D ajanhetkellä $(0 - 1) \cdot 10^{-5}$ s. Ideaalisen flyback-muuntimen hyötysuhde on 1 ja teho on riippumaton kuormasta, jolloin jännite määräytyy suoraan kuorman resistanssista. Todellisuudessa hyötysuhde on riippuvainen kuorman resistanssista, jolloin kuorma täytyy optimoida. Tällöin kuorman jännite määräytyy arvoon, jossa teho on optimaalinen. Flyback-muuntimen hyötysuhde todellisuudessa on 70 % luokkaa, josta seuraa 2.8-kertainen tehonlisäys verrattuna tavanomaiseen diodisilta-kondensaattori piiriin. [43 s. 254–261].

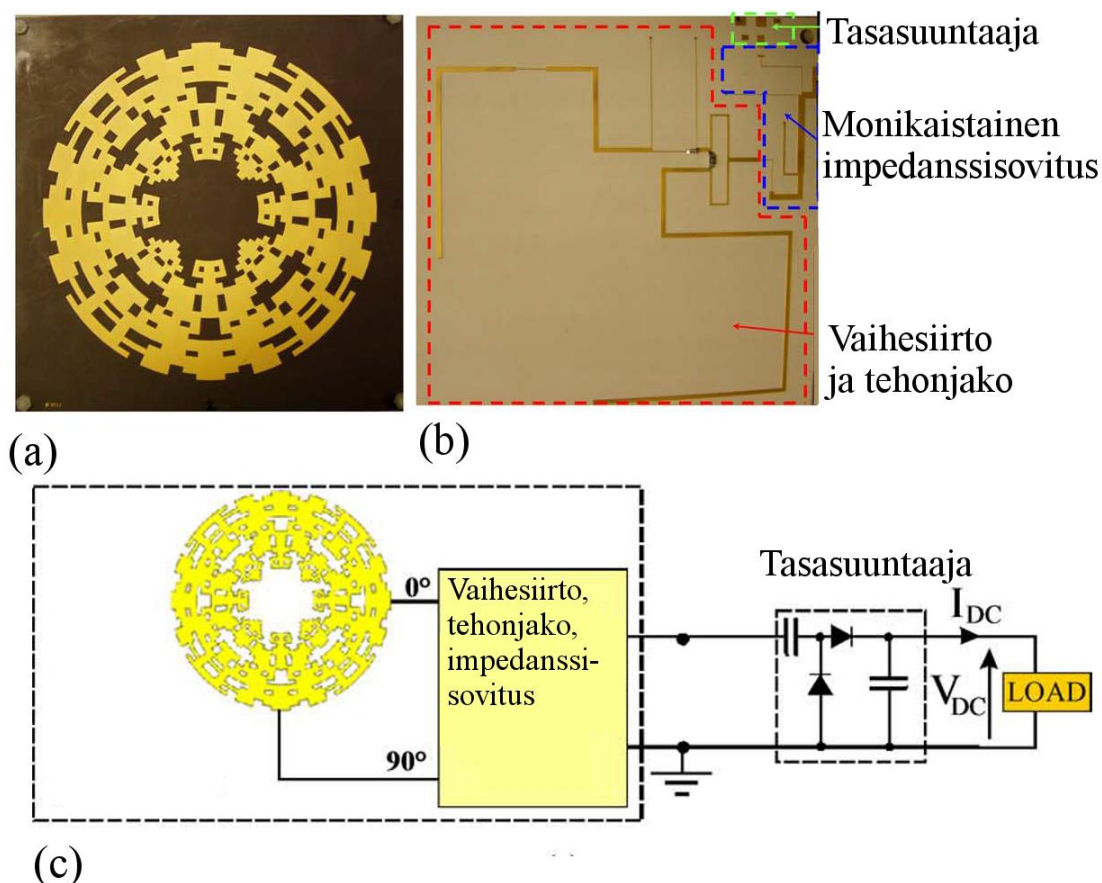
Esitellyissä tekniikoissa on oletettu harmoninen värähtely tietyllä taajuudella. Esitellyillä SSHI-tekniikalla voidaan saavuttaa kymmenkertainen tehonlisäys verrattuna tavanomaiseen piiriin harmonisessa värähtelyssä ja optimoidulla kuormalla. Värähtelyn ei tarvitse olla resonanssitaajuisia. SECE-tekniikka soveltuu paremmin satunnaisesta värähtelystä kerättyyn energiaan, sen itsesäätävän luonteen takia. SECE- toimii myös paremmin laajemmalla kuormaresistanssien arvoilla.

3.2.3 Radiotaajuisen energian keräys

Radiotaajuisella keräyksellä tarkoitetaan energian keräystä suoraan lukijan signaalista tai ympäröivästä radiotaajuisesta sähkömagneettisesta säteilystä. Kerääjänä toimii joko laitteen signaalinvälityksessä käytettävä antenni [45] tai ympäröivän säteilyn keräämiseen tarkoitettu yksi tai useampi antenni. [46] Kaapattu sähkömagneettinen säteily voidaan hyödyntää vasta, kun se on tasasuunnattu ja suodatettu.

Ympäröivän säteilyn keräämisessä on hyvä ottaa huomioon mitä taajuuksia ympäristössä on paljon, ja kuinka suuria tehoja niistä on mahdollista saada kerättyä. Tällöin kerätyt taajuusalueet voidaan kohdentaa halutuille taajuusalueille, jolloin hyötysuhde, laitteen monimutkaisuus ja koko voidaan optimoida.

Carvalho et al. [45] esittivät laitteen, jossa keräys on toteutettu laajakaistaisella antennilla, vaiheen siirtäjällä, tehon jakajalla ja tasasuuntaajalla. Kuvassa 3.19. on esitetty laajakaistaisella antennilla toteutettu systeemi.



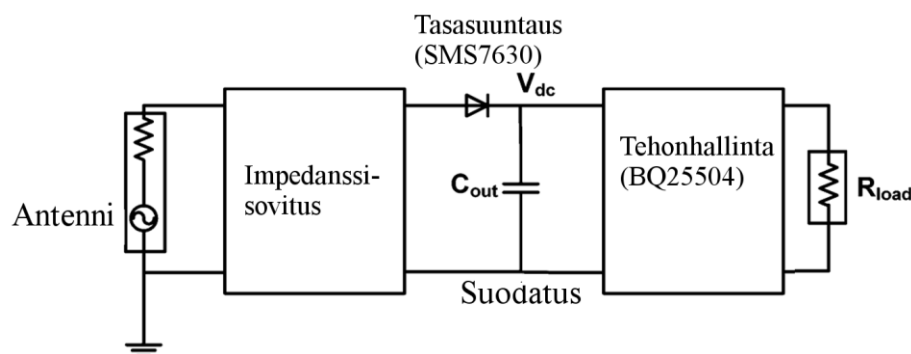
Kuva 3.19. Kuvassa esitetty laajakaistaisella antennilla toteutettu radiotaajui-
nen keräin. (a) Laajakaista-antenni. (b) Antennin kääntöpuolella oleva piiri. (c) Keräi-
men piirikaavio. [45]

Antenni on neljälle taajuuskaistalle viritetty ja ympyräpolarisoitu. Ympyräpolarisointi on yksi tärkeä lähtökohta energian keruun kannalta, koska saapuvan säteilyn polarisaatio voi vaihdella ja se on ennalta tuntematon muuttuja. Vaihesiirto ja tehonjako vaiheet ovat suunniteltu neljälle toimintakaistalle ja ne takaavat, että taajuuskaistojen vaiheet eivät kumo toisiaan. Lisäksi käytettiin impedanssisovitusta, jolla pyritään maksimoimaan kerä-
tyn tehon siirtymistä kuormalle. Jos impedanssisovitus on huonosti toteutettu, signaali voi pahimmassa tapauksessa heijastua, eikä kuormalle saada siirrettyä tehoa. Kuormana käytettiin vakiokuormaa. Vakiokuormalla saavutettiin 900 MHz taajudella parhaimmil-
laan yli 40 % RF - DC hyötysuhde 0,8 mW lähetysteholla antennin kohdalla ja noin 19 % hyötysuhde 2450 MHz 0,15 mW lähetysteholla. Hyötysuhdetta pystytään edelleen pa-
rantamaan korvaamalla kuorma maksimitehopisteen seurantapiirillä. Tehopisteen seuran-
taa vaikeuttaa antennin epälineaarinen toiminta, joka riippuu keräin antennin saavutta-
vasta lähetystehosta. Lisäksi maksimitehopiste siirtyy taajuuden mukana. Tehopiste on
kuitenkin lähellä piirin tasasuunnatun jännitteen puolikasta, jolla päästään lähemmäs op-
timaalista toimintaa. [45]

Pinuela et al. [47] valmistivat laitteen, jossa käytetään useita erillisiä tietyille taajuuksille viritettyjä lineaarisesti polarisoituja dipoliantenneja. Antennit kytkettiin impedanssisovituksen kautta tasasuuntaajalle, suodattimeen, maksimitehopisteen seuraajaan ja varastona toimivan kondensaattorin kautta kuormalle. Kuormana toimi diodi, joka kytkeytyi päälle ja pois määritetyillä kynnyksjännitteillä. Dipoliantennien viritystaajuudet valittiin vastaamaan yleisiä tunnettuja lähetystaajuuksia, jotka ovat: DTV (460–610 MHz), GSM900 (925–960 MHz), GSM1800 (1805–1880 MHz), 3G (2110–2500 MHz). Antennityypin valinta perusteltiin niiden yksinkertaisuudella, säteilykuvion symmetrisyydellä, skaalautuvuudella ja valmistuksen helppoudella. Valmistetun systeemin suurimmat potentiaaliset tehot laskettiin olevan GSM 900 ja 1800 MHz:n taajuuksilla, ja pienimmät 3G taajuudella.

Impedanssisovitus toteutettiin yksinkertaisella neljäsosa-aallonpituuisella oikosuljetulla shunt -johteella sekä sarjaan kytketyllä kelalla. Kelan sähköinen pituus oli huomattavasti aallonpituutta lyhyempi. Kelan tarkoitus oli kompensoida diodin hajakapasitanssia. Impedanssisovitus pyrittiin saaman mahdollisimman lähelle 50 ohmia.

Tasasuuntaus toteutettiin nolla -bias Schottky-diodilla, joka kytkettiin sarjaan antennin ja impedanssisovituksen kanssa. Kuvassa 3.20. on esitetty piirin kaaviokuva.



Kuva 3.20. Kuvassa esitetty Pinuela et al. valmistaman piiriin kaaviokuva. [47]

Suodatinkondensaattori on kytketty tasasuuntauksen jälkeen diodin rinnalle. Suodatin-kondensaattorin todettiin vaikuttavan hyvin vähän impedanssisovitukseen, jos se otetaan siinä huomioon. Suuresta kapasitanssin arvosta aiheutuu kuitenkin häviöitä, koska sitä joudutaan kompensoimaan induktanssilla.

Tehonhallinta toteutettiin pienitehoisella Texas instrumentsin valmistamalla BQ25504- IC-piirillä. Piiriin päädyttiin sen pienen tyhjäkäyntivirran (< 330 nA) ja pienen tulojännitteen (~80 mV hot start, 330 mV cold start) takia. Piiri sisälsi boost-muuntimen, joka nosti ulostuloa 2,4–5,3 volttiin ja akkuhallinta moduulin, jota käytettiin ulostulon tehon säätelyssä. Maksimitehopisteen seuranta oli toteutettu ottamalla näyte avoimen piiriin jännitteestä, jonka jälkeen virtaa säädettiin niin, että ulostulojännite oli ennalta ohjelmoidulla tasolla. Resistiivisen lähdeimpedanssin tapauksessa maksimitehopiste saavutetaan, kun ulostulojännite on avoimen piiriin jännitteen puolikas. Antenni-systeemin ta-

pauksessa optimiarvo vaihteli 0,48–0,53 kertoimien välissä. IC-piirin kuormana toimi varastokondensaattori ja sen rinnalle kytketty pienitehoinen ledi. Systemillä päästiin parhaimmillaan $7,4 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ tehotehyyteen GSM900 ja GSM1800 kupariteipistä valmistetulla dipoliantennilla. Tilavuuteen oli laskettu mukaan antenni, tasasuuntaaja ja tehonhallinta ilman varastokondensaattoria. [47]

Toinen tapa on kerätä energiaa suoraan lukijan signaalista. Yeager et al [45] valmistivat lukijan signaalia energian keruussa hyödyntävän passiivisen rfid tagin, jossa oli tiedon tallennusominaisuus (PDL, passive data logger). Lukijan signaalista kerätty energia tallennettiin kondensaattoriin, josta sitä käytettiin myöhemmin ajamaan mikrokontrolleria. Käytetty mikrokontrolleri oli yleiskäyttöinen ultra-low power mikrokontrolleri. Työssä esitelty passiivinen langaton tunnistus, sekä anturialusta, (WISP-PDL, wireless identification and sensing platform) edustavat WISP sukupolvea, joka käyttää sekä EPC Class 1 Generation 2 kommunikaatio protokollaa. Aikaisemman sukupolven anturit pakottivat anturidatan tagin ID tiedoksi, joka ei toimi hyvin tallennetun tiedon välittämisessä lukijalle.

Laitteen suunnitteluperustana käytettiin toiminta-aikaa, joka määriteltiin yhdeksi päiväksi. Laitteen toimiessa, suurin energiahävikki syntyi unitilassa (sleep mode), jonka laskettiin olevan $1,8 \mu\text{A}$. Aktiivisena aikana 1 ms laite kulutti noin $500 \mu\text{A}$. Näytteiden ottoväliä pystyttiin säätämään sadoista millisekunneista kymmeniin sekunteihin. Lisäksi häviöitä voi syntyä kondensaattorin vuotovirrasta. Vuotovirta vaihtelee kondensaattorityyppien välillä, ja on syytä ottaa huomioon suunnittelussa. Seuraavana kehitysaskeleena on pienentää tyhjäkäyntivirtaa, ja ratkaisuksi ehdotetaan erittäin vähävirtaista Seikon tai Swatchin valmistamaa ulkoista kellopiiriä. Ehdotettujen kellopiirien tyhjäkäyntivirrat reguloimattomalla energialähteellä ovat keskimäärin 350 nA.

Toinen suunnittelussa huomioon otettava asia on lataus. Energiansiirtoon vaikuttaa huomattavasti latauslaitteen, eli lukijan, etäisyys tagista sekä latausaika. Ladattu energia E_{stored} voidaan laskea yhtälöllä [45]

$$E_{stored} = \frac{1}{2} C (V_{charged}^2 - V_{dd}^2) = P_{charge} T_{charge}, \quad (33)$$

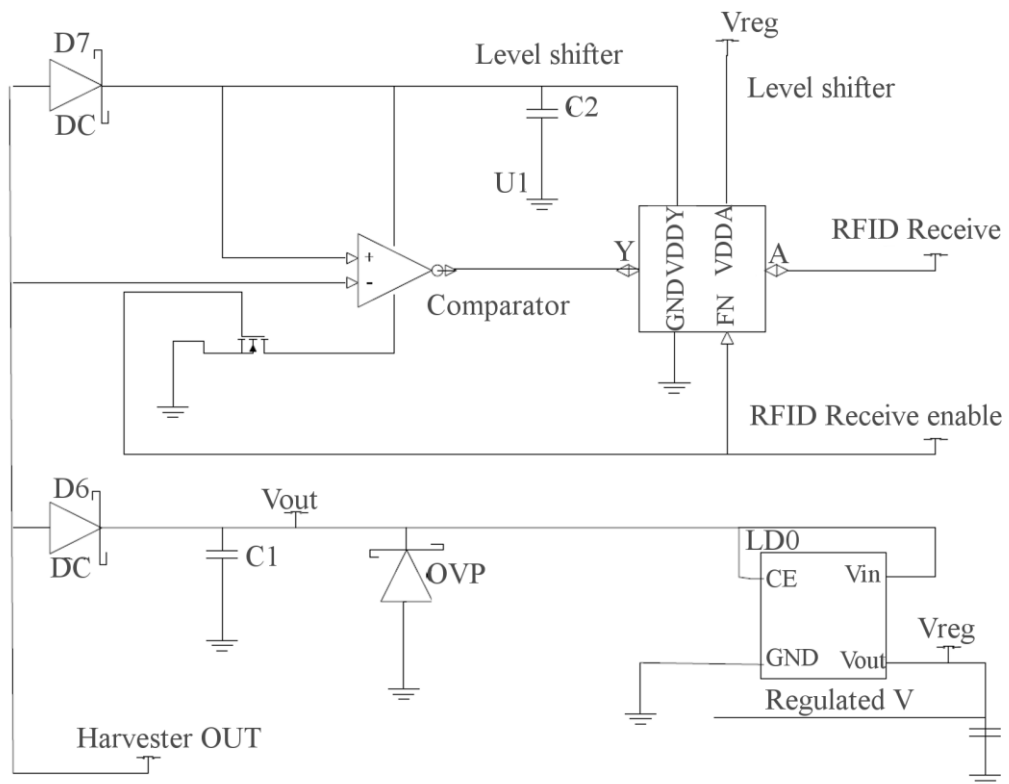
missä C kondensaattorin kapasitanssi, $V_{charged}$ on kondensaattorin latauksen jälkeinen jännite, V_{dd} on toimintajännitteen minimi, P_{charge} on latausteho ja T_{charge} on latausaika. Yhtälöllä voidaan laskea tarvittava latausaika, jos latausteho P_{charge} on tunnettu. Lataustehoa voidaan ennustaa Friis'n yhtälöllä johon on lisätty tasasuuntaajan hyötysuhde[45].

$$P_{charge} = P_T - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) + G_T + G_R - L_P + 10 \log_{10}(\eta), \quad (34)$$

missä P_T on lähetysteho, d on tagin etäisyys lukijasta, λ on aallon pituus, G_T on lähetysantennin vahvistus, G_R on vastaanottavan antennin vahvistus, L_P on polarisaatiohäviö ja η on tasasuuntaajan hyötysuhde. Hyötysuhde on lisätty oikealle puolelle lauseketta posi-

tiivisena, koska se saa arvoja nollan ja yhden väliltä, jolloin logaritmin arvo on negatiivinen. Anturin toimintaa simuloitiin seuraavilla arvoilla sekä oletuksilla: $P_T = 1$ W, taajuus = 915 MHz, joka vastaa $\lambda = 0,33$ m, $G_T = 6$ dBi, josta seuraa lähetystehoksi 4 W_{EIRP} (Effective isotropic radiation, Yhdysvaltojen sallittu lähetysteho), $G_R = 2$ dBi (dipoliantennin tyyppillinen vahvistus), $L_P = 3$ dB ja η arvoitiin empiirisesti olevan 30%. Latausaika kasvaa hyvin nopeasti etäisyyden funktiona ja lataus tulee jänniterajoitteiseksi 4,5 metrin kohdalla.

Anturi valmistettiin tunnistamaan nesteen tasoa, joka perustui kapasitanssin muutokseen nesteen pinnan tason muuttuessa. Mikrokontrolleri oli MSP430, joka pystyy ajamaan Gen 2 protokollaa. Tasasuuntauksessa käytettiin kahta matalan kynnyksjännitteen omaavia Schottky diodeja. Kuvassa 3.21. on esitetty laitteen piirikaavio.



Kuva 3.21. Kuvassa esitetty WISP-PDL piirikaavio. [45]

Komparaattoria käytetään tasavirtalähteenä. Jännite diodin D7 yli havaitsee antennista saapuvan virran, eli signaalin korkean amplitudin, positiivisena jännitteenä. Signaalin matalaa amplitudia käsitellään vastaavasti negatiivisena jännitteenä. Komparaattorilla luodaan maksimialuen (rail-to-rail) logiikkatason aaltomuoto ja kuvassa näkyvä level shifter muuntaa reguloimattoman logiikkatason signaalin reguloiduksi. Diodi D6 tasa-suuntaa virran varastokondensaattorille C1. Ylijännitesuoja OVP lukitsee jännitteen maksimin 5,5 volttiin. Erittäin matalahäviöistä lineaariregulaattoria käytetään tuottamaan 1,8 voltin reguloitu ulostulo kuormalle. Kuormana käytettiin 8 kilotavun EEPROM-muistia tallentamaan anturilta tuleva tieto. Lisäksi kuormana oli kapasitanssin muutosta mittaava anturi. Anturityyppejä voidaan vaihtaa käyttötarpeen mukaan. [45]

3.2.4 Tuulienergia

Tuulivoimalatyyppejä on muutamia. Ne jaetaan roottorin akselin suunnan mukaan pysty- ja vaaka-akselisiin voimaloihin. Pystyakselisia VAWT (vertical-axis wind turbine) tuulivoimalatyyppejä ovat esimerkiksi Savonius, Darreius ja Giromill. Vaaka-akseliset HAWT (horizontal-axis wind turbine) voimalat jaetaan etu- ja takatuulipotkurisiin voimaloihin. Etutuulipotkuriset voimalat ovat huomattavasti takatuulipotkurisia yleisempi. Tuulivoima on hyvin tunnettu teknologia sähköverkkotasolla, mutta suhteellisen tutkimaton alue hyvin pienissä milliwattiluokan sovelluksissa. Lisäksi milliwattiluokan voimailojen sijoituskohteet poikkeavat suurista voimaloista hyvin paljon. Siinä missä suuret voimalat asennetaan paikkoihin, joissa on tutkitusti hyvät tuuliolosuhteet, anturisovelluksissa voimalat asennetaan mittauspäikalle, jonka tuuliolosuhteet saattavat olla heikot. Mikrovoimalat kärsivät myös huomattavasti isompia voimaloita huonommista aerodynaamisista ominaisuuksista johtuen siivekkeiden pienestä pinta-alasta. [48] Liitteen 2 kuvassa on esitetty yläpuolella kaksi ja kolme lapainen Savonius-tyyppisen voimalan rakenne ja alapuolella kolme ja kuusi lapaisen vaaka-akselisen voimalan rakenne.

Tuulivoimala hyödyntää tuulen liike-energiaa hidastamalla tuulta ja pyörittämällä kerätyllä liike-energialla generaattoria. Tuulen energia P_w on suhteessa ilmamassaan m , joka virtaa nopeudella v . Tuulen nopeus v on pyörteettömän tuulen nopeus. Tuulen teho voidaan laskea yhtälöllä

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (35)$$

missä ρ [kg/m³] on ilman tiheys ja A on pinta-ala. Ideaalisen tuulivoimalan hyötysuhde on noin 59,3 %, joka seuraa Betzin laista. Tuuliturbiinin roottorille on määritelty hyötysuhde C_p , jolla voidaan laskea tuulesta saatu teho P_m . Huomioitavaa on, että roottorin tehokerroin ei ole vakio kaikilla tuulen nopeuksilla. Suurissa voimaloissa tätä voidaan kompensoida muuttuvalla lapakulmalla, mutta kirjallisuudesta ei löytynyt mainintaa tekniikan käytöstä milliwattiluokan voimaloissa. Voimalan mekaaninen P_m teho voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$P_m = P_w C_p \quad (36)$$

Kun otetaan huomioon mahdollisen vaihteiston hyötysuhde μ_m , sekä generaattorin hyötysuhde μ_g voidaan tuulivoimalan sähköteho laskea yhtälöllä

$$P_e = \mu_g \mu_m P_m = \mu_g \mu_m C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (37)$$

Yhtälöstä nähdään, että teho on verrannollinen tuulen nopeuden kuutioon ja suoraan verrannollinen turbiinin pyyhkäisypinta-alaan A . [49] Hyötysuhde C_p määritellään mekaanisen tehon P_m sekä tuulesta saatavilla olevan tehon P_w suhteesta yhtälöllä

$$C_p = \frac{P_m}{P_W} = \frac{\omega T}{P_W}, \quad (38)$$

missä ω on roottorin kulmanopeus radiaaneina (rad/s) ja T on tuulen roottoriin aiheuttama vääntömomentti (N*m). Kärkinopeussuhdetta λ käytetään tuulivoimalan lapakulman säätämiseen eri tuulennopeuksilla. Kärkinopeussuhteen yhtälö on

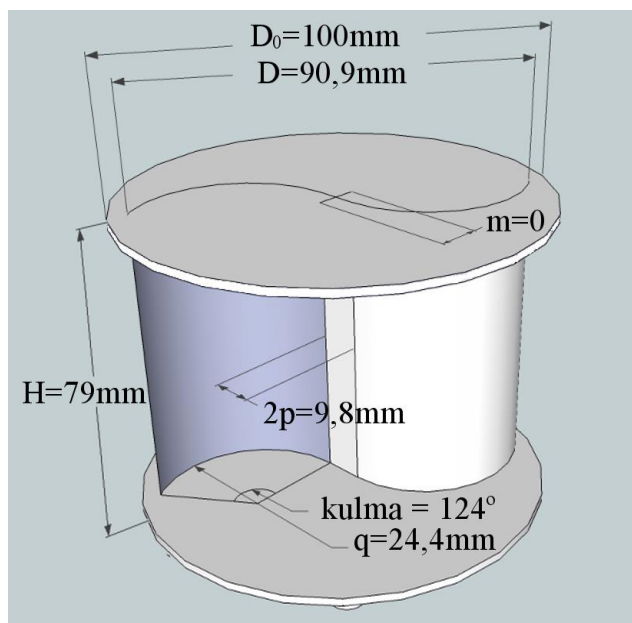
$$\lambda = \frac{\omega R}{v}, \quad (39)$$

missä R on roottorin pyyhkäisy-ympyrän säde.

Anturisovelluksissa tarvitut tehot eivät ole suuria, jolloin tärkeiksi tekijöiksi nousee generaattorin kyky käynnistyä itsestään alhaisissa tuulen nopeuksissa, sekä toiminta riippumatta tuulen suunnasta. Generaattorin koko voi myös olla rajoittava tekijä joissain anturi sovelluksissa, joten se pyritään pitämään mahdollisimman pienenä. Pienestä koosta johtuen on tärkeää tarkastella roottorin hyötysuhdetta ja vaadittua käynnistysmomenttia.

Läpi käydyssä kirjallisuudessa anturisovelluksissa käytettyjen tuulivoimaloiden tyypit ovat yleensä joko pysty-akselisia Savonius tyyppisiä voimaloita tai vaaka-akselisia voimaloita. Lapojen lukumäärä vaihtelee molemmissa tyypeissä, mutta yleensä vaaka-akselisten voimaloiden lapalukumäärä on kolmesta kuuteen ja Savonius tyyppisissä voimaloissa on yleensä kaksi lapaa.

Savonius-tyypin tuulivoimala koostuu yksinkertaisimmillaan halkaistusta sylinteristä, jonka puolikkaat ovat lomittain toisiinsa nähden. Voimalan käynnin aikainen toiminta on riippumaton tuulen suunnasta, koska sen ei tarvitse kääntyä tuulta kohti tuulen suunnan muuttuessa. Roottorin vedon aikainen kohtauskulma tuulen kanssa on suuri ja tuuli työntää lapaa toiselta puolelta ja jarruttaa toiselta (drag-type). Turbiinin siipien kärkinopeus on tällöin aina tuulennopeutta hitaampi. Tämä heikentää voimalan hyötysuhdetta. Savonius tyyppisen voimalan käynnistysmomentti on tuulen ja roottorin kohtauskulmasta riippuva. Kun tuuli osuu suoraan sylinterien puolikkaiden jakavan akselin suunnasta, käynnistysmomentti on pienimmillään. Ongelmaa voidaan kiertää liitteen 2 kaksilapaisen VAWT:n rakenteella, jossa sylinterien puolikkaiden yläpinta on kierretty 90° alapintaan nähden. Rakenteen ansiosta tuuli osuu sylinterin avoimeen osaan riippumatta roottorin asennosta. [50] Toinen vaihtoehto on asettaa kaksi suoraa roottoria päällekkäin, mutta 90° kulmassa toisiinsa nähden. Tekniikat parantavat käynnistysmomenttia epäsuotuisista kohtauskulmista, mutta toisaalta heikentävät käynnistysmomentin huippua. [49] Perinteisen roottorirakenteen hyötysuhde on noin 17 %. Savonius –roottorin rakennetta voidaan optimoida litistämällä rakennetta ja suoristamalla sisemmät sivut suoriksi. [51] Kamoji et al. [51] valmistsivat ja testasivat erilaisia Savonius –turbiinirakenteita. Parhas hyötysuhde 21 % saavutettiin kuvan 3.22. mukaisilla suhdeluvuilla.



Kuva 3.22. Kuvassa esitetty optimoidun Savonius –turbiinin rakenne ja sen mitat. Kuva mallinnettu Kamoji et al. [51] parhaiten suoriutuneen mallin mittasuhteilla (ei mittoilla). [51]

Kamoji et al. [51] esittivät parhaiten suoriutuneen roottorin rakenteen suhdeluvuilla, jotka ovat seuraavat: $H / D = 0,7$, $D_0 / D = 1,1$, $m = 0$, $\text{kulma} = 124^\circ$, $p / q = 0,2$. H on roottorin korkeus, D_0 on päätylevyjen halkaisija, D on roottorin halkaisija, m on roottorin puolikkaiden välinen aukko, p on lavan kaaren jälkeinen suora osuus roottorin keskellä, q lavan ympyrän säde, kulma on q säteisen kaaren keskuskulma.

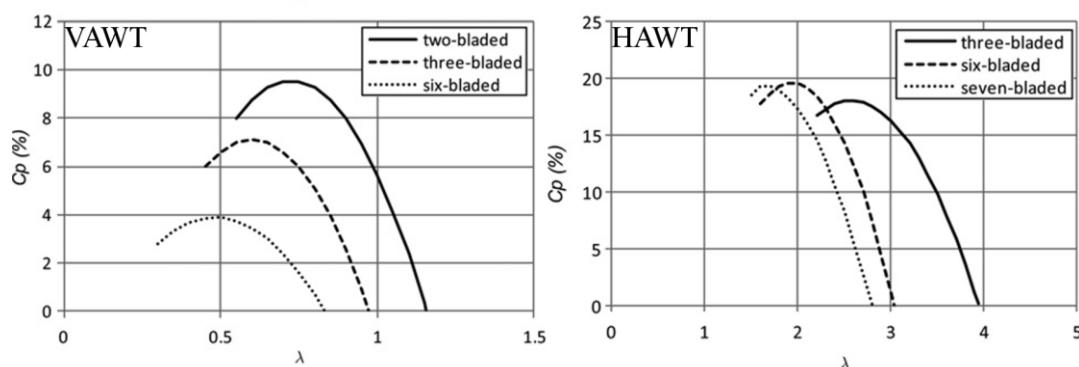
Vaaka-akseliset voimalat omaavat paremman hyötysuhteen, kuin pystyakseliset [50]. Niiden heikkoutena on, että voimaloiden roottorit täytyy kääntää aina tuulta kohti. Suurissa voimaloissa tämä tehdään usein sähköisesti, pienissä voimaloissa yleensä peräsimellä. Kun voimala on suunnattu tuulta kohti, lavat lapoihin kohdistuu tuulesta jatkuva voima. Vaaka-akselisissa voimaloissa on enemmän liikkuvia osia, kuten generaattorin akselin laakerointi sekä roottorikotelon ja maston välinen laakerointi. Sähkö täytyy myös yleensä tuoda roottorikotelosta ulos joko johdoilla tai liukurenkailla. Johtoja käytettäessä täytyy pitää huoli, että roottori ei kierry liikaa samaan suuntaan. Pystyakselisen voimalan generaattorin sähköiset osat ovat roottorista erillään, kiinni pääakselissa, mikä yksinkertaistaa rakennetta ja helpottaa valmistamista.

Vaaka-akselisen voimalan energian keräys tuulesta perustuu lapojen aiheuttamaan nosteeseen. Läpi käydyssä kirjallisuudessa ei ollut mainintoja milliwattiluokan voimaloiden mahdollisesta lapakulman käytön aikaisesta säädöstä. Tämä tarkoittaa, että tuulen ja lavan kohtauskulma on toiminnan aikana vakio. Lapakulman säädöllä voidaan vaikuttaa voimalan lavan ja tuulen kohtauskulmaan ja näin säätää tuulen lapaan aiheuttamaa momenttia ja pyörimisnopeutta [52]. Kärkinopeussuhde laskee mitä enemmän lapoja roottorissa on, mutta toisaalta momentti kasvaa. Lapojen lukumäärän kasvattaminen kasvattaa täyttökerrointa. Täyttökerroin määritellään lapojen pinta-alan ja pyyhkäisypinta-alan suhteesta. Liian suuri täyttökerroin johtaa hyötysuhteen alenemiseen, koska tuuli ei

pääse enää läpäisemään ja siirtämään energiaa roottoriin. Toisaalta liian pienillä täyttö-kertoimilla tuuli ei pysty siirtämään energiaa roottoriin. [50]

Läpikäydyssä kirjallisuudessa käytetyt milliwattiluokan generaattorit olivat yleensä kestopagneettigeneraattoreita, joiden magneetit oli sijoitettu pyörivälle akselille (roottorille) ja kelat pysyivät paikoillaan (staattori). Yleisimmät generaattorimallit olivat aksiaali ja radiaalivuogeneraattoreita. Aksiaalivuogeneraattorissa magneettivuo on akselin suuntainen. Radiaalivuogeneraattoreissa vuo on kohtisuorassa roottorin akseliin nähden.

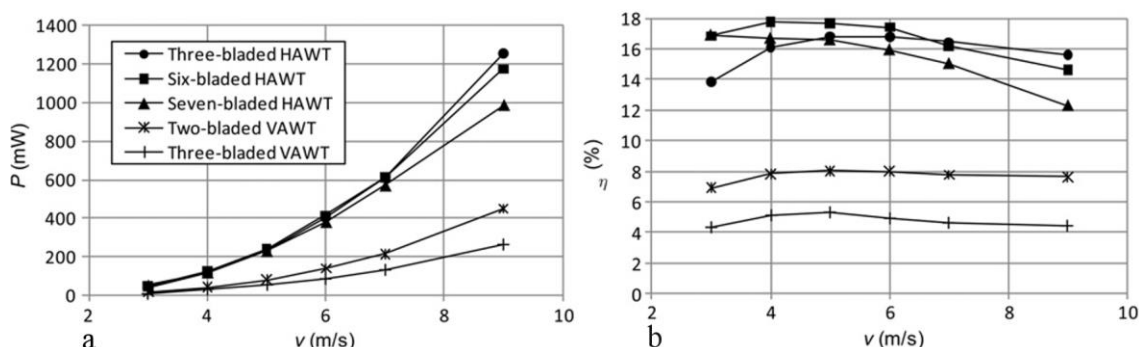
Azevedo et al. [50] tekivät vertailun HAWT Savonius tyyppin, ja VAWT tyyppin voimaloiden välillä. Testatuista Savonius- voimaloista oli valmistettu 2, 3 ja 6 lapaiset versiot. HAWT-voimaloista oli valmistettu 3,6 ja 7 lapaiset versiot. Liitteessä 2 on esitetty ylhäällä kaksi ja kolme lapaiset HAWT-voimalat ja alhaalla kolme ja kuusi lapaiset VAWT-voimalat ja niiden fyysiset mitat. VAWT-voimaloiden lavan säde on 7,5 cm ja kolmilapaisen voimalan täyterroin 0,15. HAWT-voimalan roottorin halkaisija on 7 cm ja korkeus 19 cm. Voimalat valmistettiin siten, että niillä oli sama pyyhkäisy-pinta-ala. Kaksilapaisen voimalan rakenne oli kierretty yläosasta 90° suhteessa alaosaan. Liitteessä 2 on esitetty lisää mittoja, mutta huomioitavaa on, että lähteessä ei määritelty lapojen tarkempia mittoja, kuten HAWT:n lapojen profiilia tai kohtauskulmaa tai VAWT voimaloiden lapojen tarkempaa profiilia, joten liitteen 2 kuvat ovat periaatekuvia. Voimaloiden suorituskykyä vertailtiin niiden hyötysuhteen avulla. Tätä varten mitattiin momenttia T turbiinin akselilta eri tuulen nopeuksilla ja kuormilla. Momentista ja kulmanopeudesta voidaan laskea voimalan mekaaninen teho P_m yhtälöillä (36) ja (38). Turbiinit asetettiin tuulitunneliin tehonmittaukseen, jossa niitä käytettiin 3-9 m/s tuulen nopeuksilla (Kuva 3.23.). Kuvasta voidaan nähdä turbiinien hyötysuhde lapojen kärkinopeussuhteen funktiona. Hyötysuhde on riippuva tuulennopeudesta. Kuvan hyötysuhteet ovat keskiarvois-tettu 4-7 m/s tuulen nopeuksista.



Kuva 3.23. Kuvassa esitetty VAWT ja HAWT turbiinien eri tuulen nopeuksien keskiarvoistut hyötysuhteet kärkinopeussuhteen funktiona. [50]

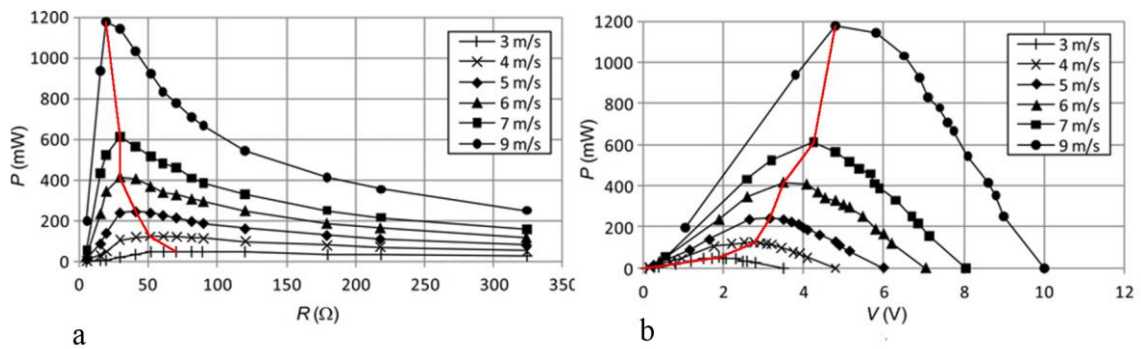
Parhaiten turbiineista suoriutui kuusilapainen HAWT, jonka hyötysuhde oli 19,6 % matalalla tuulen nopeudella. Vaaka-akselisista voimaloista kaksilapainen suoriutui parhaiten, jonka hyötysuhde oli 9,5 %.

Sähköntuotantoa varten valmistettiin pieni kolmivaiheinen kestopagneetti-generaattori, jonka ulostulo oli kytketty Schottky-diodeista valmistettuun diodisiltaan, jonka rinnalle oli kytketty kondensaattori. Generaattorin staattorissa oli kuusi kelaa, joissa 100 kierrosta 0,2 mm halkaisijaltaan olevaa kuparilankaa kelaa kohden. Roottorissa oli kahdeksan neodmium magneettia. Generaattorin halkaisija oli 5 cm ja korkeus 3 cm. Diodisilta oli kytketty resistiiviseen kuormaan, jonka vastusta muutettiin 5-325 Ω . Kuvassa 3.24. on a-kohdassa esitetty tuulivoimaloilla tuotetut tehot eri tuulen nopeuksilla ja b-kohdassa voimaloiden koko systeemin hyötysuhde eri tuulen nopeuksilla.



Kuva 3.24. a) Kuvassa esitetty voimaloiden teho tuulennopeuden funktiona ja käyrien selitykset. b) Kuvassa esitetty voimaloiden hyötysuhteet tuulen nopeuden funktiona. [50]

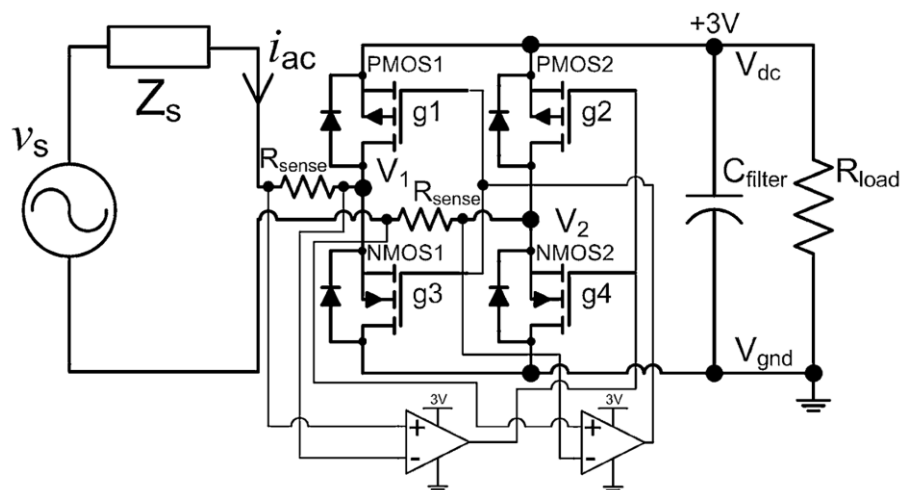
Kuvasta nähdään, HAWT -voimaloiden tehontuotot seuraavat toisiaan suhteellisen tarkasti noin 5 m/s asti, jonka jälkeen kuusilapainen tuottaa eniten tehoa 7 m/s asti. Kolmilapaisen pieni täytekerroin nostaa sen tehokertoimen huippua suuremmilla tuulennopeuksilla, joka voidaan todeta parhaana tehontuotona sekä hyötysuhteena kuvasta. Kuusilapaisen hyötysuhde on suurin matalilla tuulen nopeuksilla. Pienet erot tehontuotannossa pienillä <5 m/s tuulen nopeuksilla selittyy generaattorin hyötysuhteen heikkenemisestä pienillä kulmanopeuksilla. Voimalan toiminta on paikkakohtaista, koska mittaustaikojen tuuliolosuhteita on vaikea ennakoida. Tästä syystä voimala on lähtökohtaisesti hyvä mittaamaan matalille tuulennopeuksille. Kuusilapainen turbiini suoriutui parhaiten matalilla tuulennopeuksilla. Voimalan tehoa tarkastellaan jännitteen ja resistanssin funktiona kuvassa 3.25.



Kuva 3.25. a) Kuvassa esitetty kuusilapaisen HAWT –voimalan tehon tuotto resistanssin funktiona eri tuulen nopeuksilla. b) Kuvassa esitetty kuusilapaisen HAWT –voimalan tehon tuotto jännitteen funktiona eri tuulen nopeuksilla. Kuvissa punainen käyrä seuraa käyrien maksimia. [50]

Kuvasta nähdään, että kuormaresistanssi maksimiteholla eri tuulen nopeuksilla ei ole vakio. Tämä tarkoittaa, että maksimitehopisteen seurannalla on mahdollista optimoida tehontuottoa. [50] Maksimitehopisteen seuranta on yleisesti käytössä suurissa voimaloissa, mutta läpikäydyssä kirjallisuudessa sen käyttö oli harvinaista milliwattiluokan voimaloissa. Lisäksi tasasuuntaus diodeilla on haasteellista, koska millivattiluokan voimat eivät tuota suuria jännitteitä, jolloin diodissa syntyvä jännitehäviö on huomattava. Jännitehäviötä on mahdollista pienentää käyttämällä MOSFET:ejä, koska niiden ylimenojännite on diodeja pienempi.

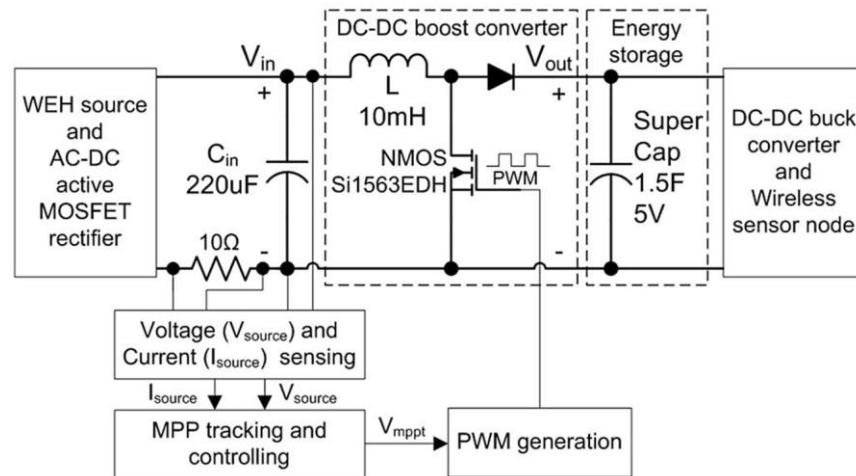
Tan et al. [48] valmisti voimalan korkean hyötysuhteen järjestelmän MOSFET tasasuuntauksella ja maksimitehopisteen seurannalla. Tasasuuntauksen ongelma MOSFET –transistoreja käytettäessä on niiden ohjaus. Ohjaus voidaan toteuttaa jännitteen tai virranseurannalla. Komparaattori tunnistaa napaisuuden ja ohjaa transistorit johtamaan (ON) tai johtamattomaan (OFF) tilaan. Pienillä sisääntulojännitteillä komparaattorit voivat alkaa värähtelemään, mikä heikentää saatavaa tehoa huomattavasti. Tästä syystä päätettiin virran suuntaan perustuvaan ohjaukseen. Kuvassa 3.26. on esitetty toteutetun tasasuuntauksen piirikaavio. [48]



Kuva 3.26. Kuvassa esitetty MOSFET –tasasuuntaaja ja sen ohjauksen piirikaavio. [48]

Tasasuuntaaja koostuu neljästä MOSFET:sta: PMOS1 ja PMOS2 johtavat generaattorin positiivisen ja negatiivisen jännitteen jaksot kuormalle ja NMOS1 ja NMOS2 kuormalta maapotentiaaliin. Virtaohjaus on toteutettu kahdella LMC7215 komparaattorilla, joiden ylimenojännite on nolla. Esimerkissä toteutetun virtaohjauksen tehonkulutus kokonaisuudessaan on $90 \mu\text{W}$. Komparaattorit mittaavat jännitettä R_{sense} vastusten ylitse ja antavat ohjaussignaalin transistoreille. Komparaattoreiden teholähteenä toimii ulostulon kondensaattori C_{filter} . Jos kondensaattori on tyhjä, eikä pysty tarjoamaan tehoa ohjaukselle, transistoreiden rinnalle kytketyt diodit tarjoavat vaihtoehtoisen reitin virralle. Tällöin piiri toimii tavallisena diodisiltana. Positiivisella generaattorin jännitteen jaksolla PMOS1 ja NMOS2 ovat ON –tilassa ja PMOS 2 ja NMOS1 ovat OFF –tilassa. Negatiivisella generaattorin jännitteen jaksolla PMOS1 ja NMOS2 ovat OFF –tilassa ja PMOS 2 ja NMOS1 ovat ON –tilassa.

Maksimitehopisteen seuranta on toteutettu boost –tyyppisellä DC-DC –muuntimella. Muunnin pyrkii optimoimaan generaattorille näkyvää kuormaa. Muuntimella on kaksi tehtävää: nostaa jännite ulostulon tasolle, sekä suorittaa maksimitehopisteen seuranta. Seuranta toteutettiin optimikuormaa emuloivalla mikrokontrollerilla, joka ohjasi pulssinleveysmodulaattoria (pulse width modulation, PWM). PWM ohjaa boost –muunninta. Kuvassa 3.27. on esitetty ohjauksen periaatekuva.

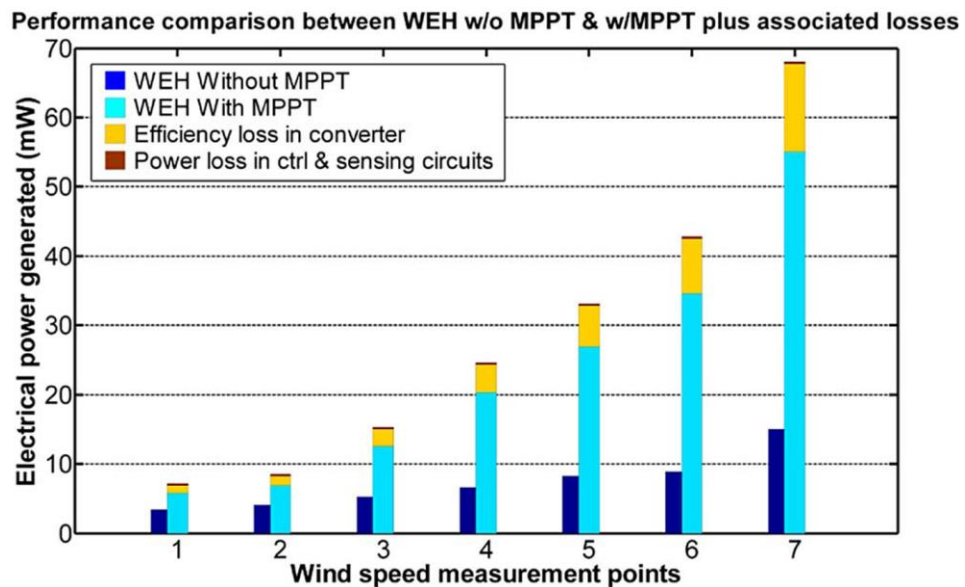


Kuva 3.27. Kuvassa esitetty boost –muuntimen ohjauksen periaatekuva. [48]

Tehonsiirto tasasuuntaukselta kuormalle koostuu kolmesta osasta: boost –muuntimesta, joka siirtää tehon kuormalle, energiavarastoon ja langattomaan anturipiiriin, kuormaa emuloivasta maksimitehopisteen seurannasta ja PWM:sta. Mikropiiri laskee generaattorin vastuksen R_{fb} generaattorin tasasuunnatusta jännitteestä sekä virrasta. Virtamittaus on toteutettu jännitteen mittauksena kuvassa näkyvän 10Ω vastuksen yli. Mikrokontrolleri vertaa generaattorin vastusta generaattorin optimivastukseen $R_{opt,ref}$ ja säättää emuloitua vastusta R_{em} sopivaan arvoon muuttamalla PWM:n pulssisuhdetta D . Pulssisuhde voidaan laskea yhtälöllä

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{em}}{R_{load}}}, \quad (40)$$

missä R_{load} on kuorman edustama vastus. Tarkempi piirikaavio on liitteessä 3, josta nähdään toteutettu piirilohko ja komponenttitasolla. Liitteen kuvasta nähdään miten R_{fb} muodostuu ja kuinka R_{em} lasketaan $R_{opt,ref}$:sta ja R_{fb} :sta. Kuvasta nähdään myös käytettyjen piirien mallit. Mikrokontrollerin matala alle 100 Hz:n taajuus kerrotaan PWM:ssa 100 kHz:lla. Näin voidaan pienentää boost –muuntimen suodatin komponentteja. Maksimitehopisteen seurannan (boost –muunnin, virta- jännitemittaus, mikrokontrolleri ja PWM) tehonkulutus on kokonaisuudessaan 0,357 mW. Muuntimen hyötysuhde vaihtelee välillä 80–86 % riippuen kuormituksesta. Kuvassa 3.28. on vertailtu tuulivoimalan tehontuotantoa eri tuuliolosuhteissa.



Kuva 3.28. Kuvassa esitetty tuulivoimalan tehontuotanto eri tuulen nopeuksilla maksimitehopisteen seurannalla ja ilman. [48]

Kuvasta nähdään, että maksimitehopisteen seurannalla voidaan tehontuotantoa kasvattaa huomattavasti häviöiden kasvusta huolimatta. Lisäksi voidaan huomata, että virran ja jännitteen mittausspiirin häviöt edustavat pientä osaa kokonaishäviöistä. Suurin osa häviöistä tapahtuu boost -muuntimessa.

Energiavarastona käytettiin superkondensaattoria sen pitkän toimintaiän sekä lataus- ja purkauskäytävyyden takia. Superkondensaattorin käyttö oli myös osasyynä käytetyn maksimitehopisteen seurantatopologian valinnassa. Kun kondensaattori on tyhjä, se näkyy energialähteelle oikosulkuna ja ottaa maksimivirran. Tällöin diodisillan jännite tippuu kondensaattorin jännitteen tasolle, jos virtaa ei rajoiteta. Esimerkissä käytetyllä kuormalla emuloivalla maksimitehopisteen seurannalla tätä ongelmaa ei ole. [48]

3.2.5 Valosähköiset paneelit

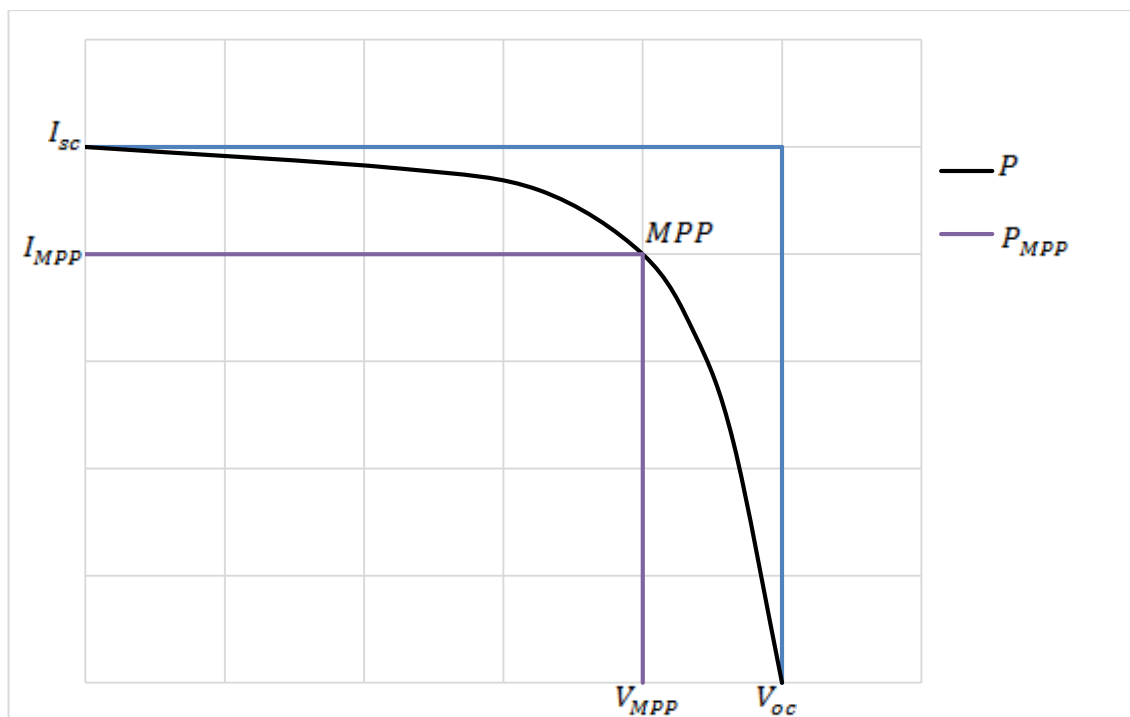
Valosähköiset paneelit, tunnetaan myös aurinkopaneeleina, ovat olosuhteista riippuen erittäin varteenotettava energianlähde, sillä niiden tuottama energia voi olla suhteellisen suuri. Tuotettu energia on suoraan suhteessa valon intensiteettiin G , sekä käytettävissä olevaan pinta-alaan A . Ilman energiavarastoa ne eivät kuitenkaan toimi jatkuvasti, jos valon saanti ei ole jatkuvaa. Aurinkokennot usein lataavatkin rinnalle kytkettyä akkua tai superkondensaattoria. Teknologioita on nykyään monia. Työssä esitellään yleisimmät ja tehokkaimmat kidepohjaiset sekä tehokkaimmat joustavan rakenteen kennotyypit.

Puolihohteisin perustuvien valosähköisten paneelien toimintaperiaate on hyvin tunnettu. Esimerkiksi perinteinen piipaneeli koostuu yksittäisistä kennoista. Kennot sisältävät pn-liitoksen, joka on seostettu siten, että n-puolelle muodostuu ylimääräisiä negatiivisia varauksia ja p-puolelle aukkoja. Tämä tarkoittaa, että n-puolella on ylimääräisiä elektroneja ja p-puolella vapaita aukkoja elektroneille. Seosteaineina voidaan käyttää esimerkiksi fosforia n-puolelle ja booria p-puolelle. Tyhjennysalue muodostuu, kun p- ja n - tyyppin puolihohteet yhdistetään. Elektronit pyrkivät rekombinoitumaan p-puolen aukkojen kanssa ja syntyneet aukot siirtyvät kohti n-puolta, ja rajapinnalle muodostuu alue, jossa ei ole vapaita varauksen kuljettajia. Sopivalla energialla tyhjennysalueelta voidaan virittää elektroni, joka sähkökentän vaikutuksesta siirtyy n-puolelle, ja syntynyt aukko p-puolelle. Tyhjennysalue estää syntyneen elektroni – aukko parin rekombinoitumisen, jolloin pn-liitoksen yli syntyy jännite. Elektronin virittämiseen tarvittavan energian suuruus riippuu käytetyn materiaalin valenssikuoren ja johtavuuskuoren välisestä energia-aukosta. Fotonin energian täytyy ylittää tämä energia. [53 s. 72-90, 131, 289]

Syntynyt virta johdetaan johtimilla aurinkokennon napoihin. Avoimesta piiristä voidaan mitata tyhjäkäyntijännite V_{oc} , joka kuvaa kennon maksimijännitettä tietyllä valoteholla. Oikosuljettaessa piiri, voidaan mitata oikosulkuvirta I_{sc} . Kuorma pitää mitoittaa oikein, jotta siihen voidaan siirtää maksimiteho P_{MPP} . Maksimitehopiste määrittää jännitteelle sekä virralle arvot yhtälöllä

$$P_{MPP} = V_{MPP} * I_{MPP}, \quad (41)$$

missä V_{MPP} on jännite ja I_{MPP} virta maksimitehopisteessä MPP. Huomioitavaa on, että maksimitehopiste kuvaa kennon navoista mitatun tehon maksimiarvoa tietyssä lämpötilassa ja tietyllä säteilyintensiteetin arvolla. Tällöin kennossa tapahtuvat häviöt tulevat huomioiduksi. Kuvassa 3.29. on esitetty tyypillisen aurinkokennon kuten pii-pohjaisten I-V-käyrä. Kuvasta voidaan lukea saatava teho P ja maksimitehopiste P_{MPP} .



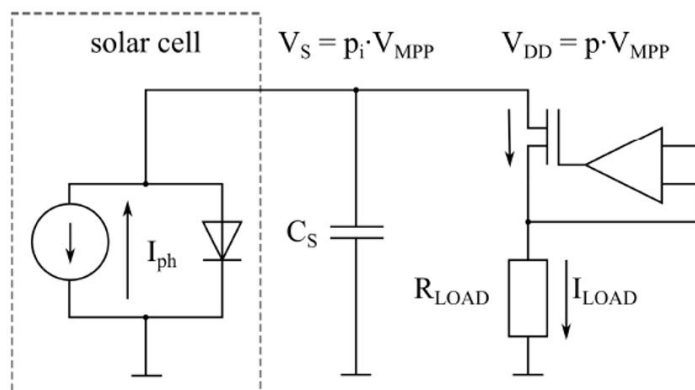
Kuva 3.29. Aurinkokennon $I(V)$ -käyrä. [53 s. 76]

Maksimiteho saavutetaan, kun virran ja jännitteen muodostama pinta-ala maksimoituu. Teho on verrannollinen valon intensiteettiin kennon absorboimalla spektrialueella. Valosähköisten paneelien hyötysuhteet määritetään yleensä $G = 1000 \text{ W/m}^2$ intensiteetillä AM1.5 spektrillä [54]. Liitteessä 4 on esitetty valosähköisten paneelien hyötysuhteiden kehitys 12/2013. Käytetyimmät paneelit ovat yksiliitoksia (single junction) moni- tai yksikide pii-paneeleita (multi crystal, single crystal) [55], joiden hyötysuhteet ovat 15–25% luokkaa (liite 4). [53 s. 76]

Anturisovelluksissa valosähköisten paneelien käyttö on yleistä, mutta ei täysin ongelmaton. Mitoittava tekijä on usein anturin toiminta-aika, koska antureiden asennus monesti maksaa enemmän, kuin itse anturi. Vaadittu toiminta-aika saattaa olla vuosia, jolloin on tärkeää, että paneeli on laadukas ja teholtaan riittävä. Lisäksi täytyy olla selvillä kuinka paljon valoa asennuspaikalle tulee. Anturin rakenteesta, kuten mahdollisesta energiavarastosta, riippuen voidaan aurinkokennoilla saavuttaa hyvin pitkiä toiminta-aikoja. [56] Paneelia on myös hyvin tärkeä ohjata oikein, eli mahdollisimman lähellä maksimitahopistetta. Esimerkkinä voidaan ajatella sovelluksia, joissa ladataan 12 V akustoa aurinkopaneeleilla. Kennot on kytketty diodin kautta suoraan akuille [53 s. 520]. Tästä seuraa järjestelmän tehokkuuden huomattava lasku. Kuormana oleva akku pyrkii ottamaan aina maksimivirran, joka pienenee sitä mukaa, kun akun napajännite nousee. Tämä voidaan huomata myös kuvasta 3.29. Kuorman ohjaukseen on kehitetty erilaisia ratkaisuja, jotka parantavat systeemin hyötysuhdetta huomattavasti.

Lineaariregulaattorilla voidaan saada sidottua kennolle näkyvä jännite johonkin pisteeseen, jolloin päästään lähemmäs MPP-toiminta-alueita. Kennojännite nousee kohti määritettyä referenssijännitettä ja kun se saavuttaa jännitteen regulaattori pyrkii pitämään jännitteen paikallaan päästämällä enemmän virtaa läpi. Lineaariregulaattori luottaa, että

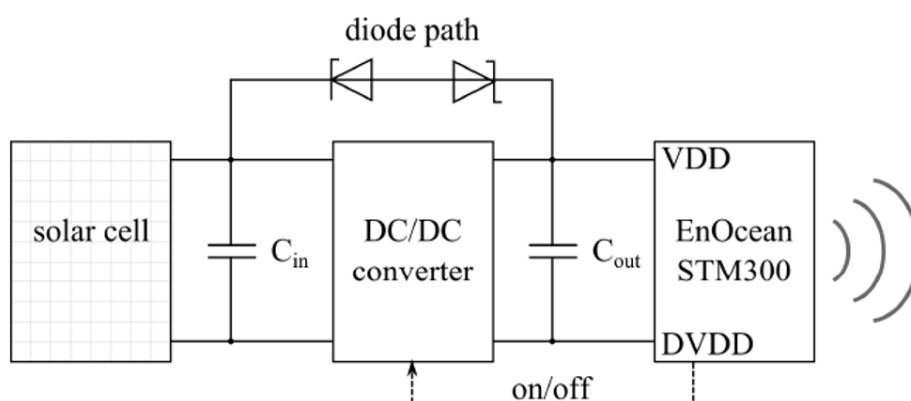
maksimitehopiste on samassa jännitteen arvossa riippumatta säteilyintensiteetistä ja lämpötilasta. Maksimitehopiste ei kuitenkaan pysy täysin samassa jännitteen arvossa. Suurimpana tekijänä ovat lämpötilan muutokset, jotka vaikuttavat maksimitehopisteen siirtymiseen huomattavasti. Kuvassa 3.30. on esitetty periaatekuva yksinkertaisesta lineaariregulaattorista, joka ohjaa kennoa tietyllä vakiokuormalla. [57]



Kuva 3.30. Aurinkokennon ohjaus toteutettuna yksinkertaisella lineaariregulaattorilla. [57]

Kuormaa voidaan vakioda liittämällä rinnalle erillinen energiavaro, mutta kennon MPP-seurannan ongelmasta ei päästä eroon. [57]

Korkean hyötysuhteen omaavalla (n.90 %) LTC 3127 DC-DC-muuntimella päästään huomattavasti parempaan tehokkuuteen, koska ohjauslogiikka voidaan tehdä niin, että MPP-seuranta on tarkempaa eri olosuhteissa. Kuvassa 3.31. on esimerkkinä STM 300 radiolähettimellä ja aurinkokennolla toteutettu systeemi, jossa aurinkopaneelia ohjataan DC-DC muuntimella. Muunnin käynnistetään vain, kun lähetin lähettää. [57]



Kuva 3.31. Esimerkkipiiri toteutettuna DC-DC-muuntimella. [57]

Radiolähetin lähettää tietoa pulsseina, ja sammuu pulssien välissä. Lisäksi lähetin antaa muuntimelle on-off komennon. Se tarvitsee hieman energiaa, jotta voi herätä määrätyn

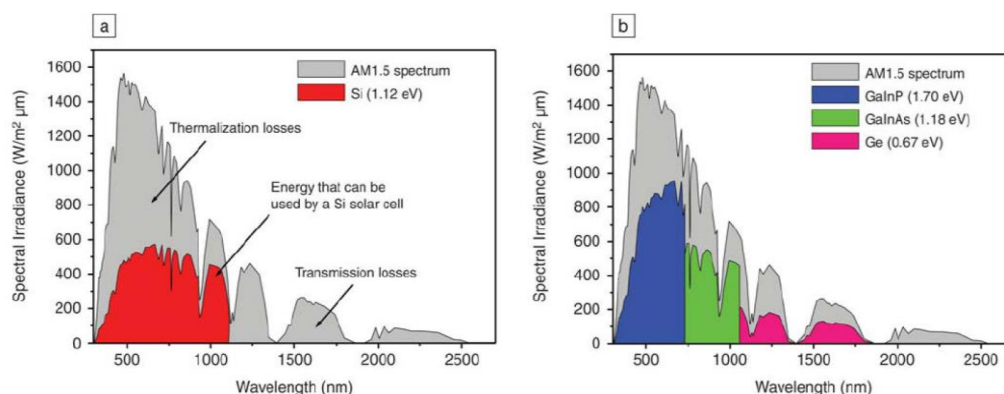
ajan kuluttua ja lähettää on-komennon muuntimelle. Tämä on ratkaistu polulla Zener-diodin (aurinkokennon puolella) ja schottky-diodin läpi. Diodit johtavat riittävästi, ja ulostulon kondensaattori pysyy ladattuna. Kondensaattori pitää jännitteen yllä ulostulossa, ja radiolähetin pystyy käynnistämään muuntimen ennen lähetyspulssia. [57]

Ensimmäisen sukupolven kennoihin kuuluu pii-pohjaiset kennot, joissa on vain yksi pn-liitos. Lisäksi on gallium-arseeni (GaAs) kennoja, joilla on piitä parempi hyötysuhde. Teoreettinen maksimi hyötysuhde (Shockley-Queisser limit) yksiliitoskennoille on 33,5 %. Tutkimuskennoilla on yksiliitos kennoille saavutettu hyötysuhteita: yksikide-pii 27,6 %, monikide pii 20,4 % ja GaAs:lle 29,1 %. [58]

Toisen sukupolven valosähköiset paneelit perustuvat ohutkalvopuolijohteisiin. Tällaisia voidaan valmistaa esimerkiksi amorfisesta piistä (a-Si), cadmium-telluridista (CdTe), kupari-indium-gallium-diselenidistä (CIGS). Ohutkalvokennojen hyötysuhteet ovat heikompia verrattuna ensimmäisen sukupolven kennoihin, noin 6 % -10 %. Valmistuskustannukset ovat kuitenkin halvemmat, jolloin hinta-teho suhde paranee. Lisäksi massan pieneneminen mahdollistaa asentamisen kevyihin tai joustaviin materiaaleihin, jopa kankaisiin [59]. Tutkimuskennoilla on saavutettu kennoille hyötysuhteita: CIGS 22,8 %, CdTe 19,6 %, a-Si 13,4 %. (Liite 4)

Kolmannen sukupolven kennoja edustaa moniliitoskennot, väriaineilla herkistetyt nanokristalli eli Grätzel kennot, orgaaniset polymeerikennot, kuumen varauksenkantajan kennot (hot carrier solar cell), monivöiset ja lämpösähköiset kennot (multi-band thermovoltaic solar cell).

Lisäämällä kennoon kerroksia voidaan saavuttaa huomattavasti korkeampia hyötysuhteita. Tällaisia kennoja kutsutaan moniliitoskennoiksi. Kuten yksiliitoskennotkin, moniliitoskennot sisältävät usein joko piitä tai gallium-arseenia. Lisäkerroksien tarkoitus on käyttää hyväksi korkeamman energian omaavia fotoneja. Kerrostamalla eri energia-aukon omaavia materiaaleja, voidaan hyötykäyttää yksiliitoskennoissa normaalisti lämmöksi muuttuvaa energiaa enemmän. Korkean hyötysuhteen kennojen energia-aukoilla pyritään kattamaan mahdollisimman paljon auringon spektristä. Kuvassa 3.32. on esitetty yksiliitos sekä moniliitos kennojen teoreettiset hyötysuhteet pinta-aloina AM1.5 säteily spektrillä.



Kuva 3.32. Kuvassa on esitetty teoreettiset hyötysuhteet pii-kennoille (a) ja GaInP/GaInAs/Ge (b) [59]

Kerrostus on tehty siten, että pienen energia-aukon omaavat materiaalit ovat aina suuremman alapuolella. Fotonin saapuessa kennoon sen energia ei välttämättä viritä elektronia ylimmässä liitoksessa, mutta seuraavassa tai sitä seuraavassa fotonin energia riittää viritämään elektronin johtavuusvyölle. [59]

Moniliitoskennoihin käytetyillä materiaaleilla täytyy olla sopivat energia-aukot. Lisäksi kristallirakenteiden pitää olla yhteensopivia, jotta läpinäkyvyys saavutettaisiin. Kolmannen ja viidennen ryhmän alkuaineiden seokset ovat sopivimpia tarkoitukseen. Moniliitoskennot valmistetaan joko kerrokset toisistaan erillään tai kasvattamalla (monolithic growing) kerrokset toistensa päälle. Monoliittinen kasvatus on tavoista parempi, koska se mahdollistaa paremman virtayhteensopivuuden. Lisäksi se takaa paremman kristallirakenteen, sekä se on helpompi skaalata isompien paneelien tuotantoon. [59]

Moniliitoskennon ulostulovirta on rajoitettu pienimpään missä tahansa liitoksessa tuotettuun virtaan. Lisäksi virta on suoraan verrannollinen virittyneiden elektronien määrään siten, että paksussa kerroksessa fotonit virittävät enemmän elektroneja kuin ohuessa. Moniliitoskennojen teoreettinen hyötysuhde on 86,8 % [59]. Tutkimusmoniliitoskennoilla on saavutettu InGaP/GaAs/InGaAs kennolle 44.4 % hyötysuhde [60].

Orgaanisia kennoja valmistetaan usein indium-tinaoksidille (ITO), joka toimii läpinäkyvänä elektrodina kennossa. ITO-kerros on valmistettu lasille tai läpinäkyvälle muoville, jolloin rakenteeseen voidaan saada hieman joustavuutta. ITO on kuitenkin haurasta ja kallista. Jotta voitaisiin valmistaa joustavia materiaaleja, jotka kestävät paremmin muodonmuutoksia, valoa läpäisevän elektrodin on oltava jotain toista materiaalia. Vaihtoehtoina on esitetty monia teknologioita. Yksi lupaavimmista on tehdä metallilangoista ja polymeeristä kudoks, joka päällystetään johtavalla polymeerillä (PEDOT:PSS). Metallilangat tulee asetella sopivin välein siten, että läpinäkyvyys ja johtavuus maksimoituvat. Kudoksen lankojen väleihin jäävät alueet täytetään inertillä läpinäkyvällä polymeerillä siten, että metallilangat jäävät paljaaksi kudoksen toisella puolella. Valosähköinen puoli tehdään tälle puolelle esimerkiksi yleisesti orgaanisissa paneeleissa käytetystä polytiofeenista (P3HT). Taulukossa 3.1. on vertailtu P3HT ITO-kennoa P3HT PEDOT:PSS kudokskennoon. [61]

Taulukko 3.1. Valosähköisten PEDOT:PSS paneelien suorituskykyvertailu. Aktiivisena kerroksena P3HT/PCBM. [61]

Substraatti	Virrantiheys J_{sc} [mA/cm ²]	Jännite V_{oc} [V]	Täytekerroin (FF)	Hyötysuhde μ [%]
Kudos 1,6 μ m PEDOT:PSS)	8,5	0,56	0,46	2,2 \pm 0,2
Kudos 1 μ m PEDOT:PSS)	11,5	0,52	0,37	2,2 \pm 0,2
Lasi-ITO (1,6 μ m PEDOT:PSS)	9,4	0,53	0,48	2,4 \pm 0,1
Lasi-ITO (spin-cast PEDOT:PSS)	10,9	0,56	0,52	3,2 \pm 0,1

Taulukosta voidaan nähdä, että kudoksennoilla päästään lähelle lasi-ITO-kennon hyötysuhdetta. Huomattavaa on, että esiteltyt paneelit ovat tutkimuskennoja. Käytännössä kennojen hyötysuhteet jäävät pienemmiksi. Lisäksi kennojen valmistaminen suuriksi paneeleiksi lasi-ITO kennoilla vaikeampaa kuin kudoksennoilla. Lisäksi metallilankojen osuus johtavuudessa kasvaa, kun kennokoot kasvavat. [61]

4 SEMIPASSIIVISEN JA PASSIIVISEN TAGIN MITTAUKSET

Mittausten tarkoitus oli tehdä case tyyppinen esimerkki semipassiivisen tagin toiminnasta ja verrata sitä passiivisen tagin toimintaan. Mittauksissa tarkastellaan lähinnä lukijan sekä mitatun tagin ominaisuuksia lukuetaisyyksien kannalta. Tarkoituksena on esittää semipassiivisen tagin toimintaa ja sen energiavaraston tuomia etuja ja verrata niitä passiivisen tagin ominaisuuksiin. Mittauksissa käytetyt tagit ovat Tampereen teknillisen yliopiston elektroniikan ja tietoliikennetekniikan laitoksen ja mittaukset suoritettiin laitoksen tiloissa.

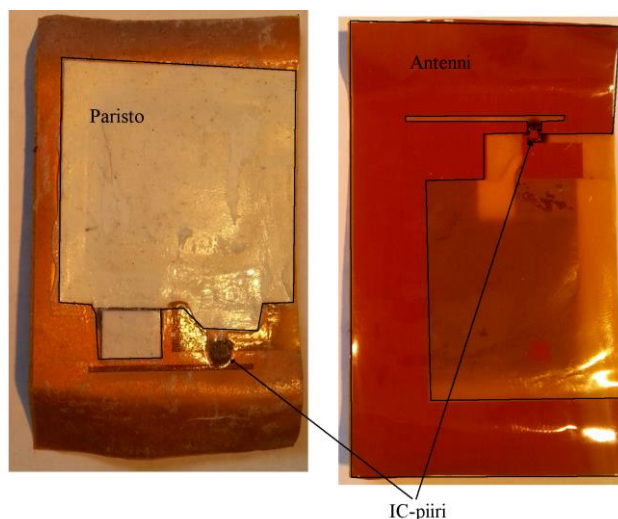
4.1 Mittausten suunnittelu

Mitatusta tagista löytyi niukasti varmaa tietoa. Tagin valmistaja on Vanch ja malli VT-3004 battery assisted passive tag. Kuvassa 4.1. laitevalmistajan tarjoama kuva tagista ja sen rakenteesta.



Kuva 4.1. Mitattava tagi ja sen antennin oletettu profiili. (VT-3004 915MHZ battery assisted passive tag)

Yksi esimerkkitageista avattiin, jotta päästiin perehtymään sen osiin paremmin. Kuvassa 4.2. on kuva avatusta tagista edestä ja takaa.



Kuva 4.2. Kuvassa yksi esimerkkitageista avattuna.

Huomataan, että rakennetta on muutettu valmistajan esimerkkekuvasta jonkin verran. Antennin pinta-ala on huomattavasti suurempi ja erimuotoinen, kuin esimerkkekuvassa. Akku on edelleen keskellä ja sen toinen napa on liimattu johtavalla liimalla suoraan antenniin, josta on väylä IC-piirille. Akun toinen napa on kytketty IC-piiriin. Taulukossa 4.1. on esitetty valmistajan sivuilta otettuja tietoja tagista.

Taulukko 4.1 Valmistajan tarjoamat tiedot tageista.

ModelModel (Order Code)	VT-3004battery assisted passive tag
performance index	
Protocol	EPC global Class1,Gen2 ISO 18000-6C,Applicable passage of hardware and software
Integrated power	Without scattering of the energy emitted from the reader get almost 100% reliable recognition rate
Frequency	840—960MHZ
Environmentally friendly batteries	adopt battery without chemical and heavy metal materials
Printed batteries	Low-cost ultra-thin and flexible label
Environment Affect Level	Anti-the liquid interference, is ideal personnel tracking label products
Memory	96bitEPC,720bit User bank,64bit TID
Power	Integrated patented disposable battery
Dimension	85x54x1.5mm
Antenna	Printed antenna
Working time	Room temperature for 2 years
Working temperature	-20°Cto +60
Humidity	5%-95% non-condensing
Application	Personnel card applications

Valmistajan sivuilta löytyy myös lista tagin ominaisuuksista. Jotka on lueteltuna seuraavaksi.

1. Patteriavustettu passiivinen tagi, tarjoaa tavallista passiivista taiga paremman lukuetaisyyden, paremman luotettavuuden sekä aktiivista taiga pienemmän koon sekä hinnan. Perustuu EPC, C1, G2/ISO18000-6C protokollaan. Lukuetaisyys voi yltyä 20:n metriin.
2. Kertakäyttöinen 915 MHz tagi käyttää ultraohutta, joustavaa, ympäristöystävällistä power paper –paristoa, jolloin ei tarvitse luottaa lukijan signaalin energiaan käynnistämään tagi.
3. Tagi on standardikokoinen ja pakattu PVC-muoviin. Voidaan soveltaa kaikenlaisiin sovelluksiin, kuten huvipuistoihin, lentokentillä matkustaja paikannukseen, turvallisuus sovelluksiin ja kulunvalvontaan

Mittauksissa oli mahdollisuus käyttää kolmea tagia. Mittauksia suoritettiin kaikille tageille ja huomattiin, että tulokset olivat lähes identtisiä. Tästä syystä päädyttiin mittaamaan kaikki mittaukset vain yhdelle tagille. Tagille suoritettiin seuraavat mittaukset.

- Threshold -mittaus. Mitataan pienin vaadittu teho, jolla tagi vastaa valmistajan lupamalla taajuusalueella. Taajuusvasteen muuttuminen eri materiaalien välittömässä läheisyydessä (Detuning). [62]
- Backscatter link budget -mittaus. Selvitettiin rajoittaako lähetysteho vai heijastunut teho lukutapahtumaa. Mittaukset suoritettiin ilmassa, metallilevyä vasten sekä vesiastiaa vasten. [62]
- Orientation sensitivity: Antennin säteilykuvio ilmassa, metallilevyä vasten sekä vesiastiaa vasten. [62]

4.2 Mittausmetodit

Mittauksissa käytettiin elektroniikan laitoksen Voyanticin valmistamaa Tagformance lite mittalaitetta yhdessä kaiuttoman mittauskammion kanssa johon kuului antenni. Mittausohjelma oli Voyanticin valmistama Tagformance 6. Ennen suoritettavia mittauksia tehtiin laitteiston kalibrointi wideband UHF reference-tagilla. Tagformancen manuaalista laitteiston tarkkuutta käsittelevässä osiossa mainitaan mittausolosuhteista seuraavaa ”When a reference tag is used for the creation of a setup file, many different sources of an error can be eliminated, such as inaccurately characterized or uncharacterized components, multipath propagation, inaccurate measurement distance, etc. Because of these properties, the measured path loss method is a very powerful tool for increasing the accuracy when measurements are carried out in a non-ideal environment. However, if the user has access to an anechoic measurement chamber, the accuracy of calculated path loss method will often be better.” Mittauksissa käytetty laitteisto edustaa manuaalissa läpikäydyistä tilanteista parasta. Vertauskohteena tilanne, jossa käytössä on kaiuton huone, ilman kalibrointi-tagia. Tällöin virheen RSS (residual sum of squares) on 1,0 dB. Pahimmassa

tapauksessa virheet summautuvat jolloin maksimivirhe on 2,30 dB. Kuva mittajärjestystä ja laitteistosta on esitetty liitteessä 5. Kuvassa näkyvän Voyanticin kaiuttoman kammion tekniset tiedot on lueteltuna taulukossa 4.2 [62], [63]

Taulukko 4.2 *Kaiuttoman kammion tekniset tiedot. [63]*

Electrical specifications	
Absorber lining	Fully anechoic
Absorber type	Pyramidic electromagnetic absorber: Back wall: 30cm absorbers, other 5 walls: 10cm absorbers
Reflectivity of the absorbers: 30 cm	800 MHz -35dB 900 MHz -34dB 1000MHz -38dB
Reflectivity of the absorbers: 10 cm	800 MHz -16dB 900 MHz -19dB 1000MHz -22dB
Shielding Effectiveness	>95dB up to 3 GHz

Semipassiivisen tagin mittaukset suoritettiin seuraavasti: Tagia mitattiin ilmassa. Ensiksi suoritettiin treshold -mittaus, jonka jälkeen suoritettiin backscatter-mittaus ja lopuksi säteilykuviomittaus. Tämän jälkeen tagi asetettiin metallilevyn pinnalle ja mittaukset suoritettiin uudelleen. Viimeisenä tehtiin mittaukset veden välittömässä läheisyydessä. Vesiastian toimi muovirasia, jonka seinämävahvuus oli alle millimetrin. Liitteessä 6 on esitetty kuvat mittauksissa käytetystä tagista ilmassa, vesiastian pinnalla sekä metallilevyllä.

Treshold -mittauksella voidaan karakterisoida tagia lähetyssignaalin taajuuden funktiona. Treshold -mittauksella tarkastellaan tagin herkkyyttä tietyllä taajuudella. Mittausta voidaan myös käyttää hyväksi, kun määritetään tagin ominaistaajuuden siirtymää ja taajuuksien vaimentumista eri materiaalien läheisyydessä. Tässä mittauksessa testattiin tagin toimintaa metallin sekä veden välittömässä läheisyydessä. Tagformancen suorittaman pyyhkäisytestin asetukset ovat lueteltu taulukossa 4.3

Taulukko 4.3. *Tagformance treshold -mittauksen sweep asetukset.*

Start frequency	800 MHz
Stop frequency	1000 MHz
Frequency step	1 MHz
Power step	0,1 dB

Treshold-mittauksen jälkeen tehtiin backscatter-mittaus. Backscatter-mittauksessa tutkitaan palautuvan (uplink, reverse) signaalin voimakkuutta suhteessa lähetyssignaaliin (downlink, forward) samalla, kun lähetyssignaalin tehoa nostetaan. Backscatter -

mittauksen yhteydessä suoritettiin myös link-budget mittaus, joka osoittaa kumpi signaali rajoittaa toimintaa. Backscatter-mittauksen pyyhkäisytestin asetukset ovat lueteltu taulukossa 4.4

Taulukko 4.4 *Tagformance backscatter -mittauksen sweep asetukset.*

Start power	-5 dBm
Stop power	30 dBm
Power step	0,1 dB
Frequency	915 MHz

Orientation sensitivity- mittauksella pystytään muodostamaan tagille säteilykuvio. Mittauskammiossa on pyörivä alusta, joka kääntää tagia suhteessa antenniin. Säteilykuvio mitattiin sekä vaaka, että pystyasennossa. Kun tagia siirryttiin mittaamaan vaaka-asennosta pystyasentoon, käännettiin antenni 90° myös, jotta polarisaatio säilyy. Taulukossa 4.5 on lueteltu orientation sensitivity –mittauksen pyyhkäisytestin asetukset.

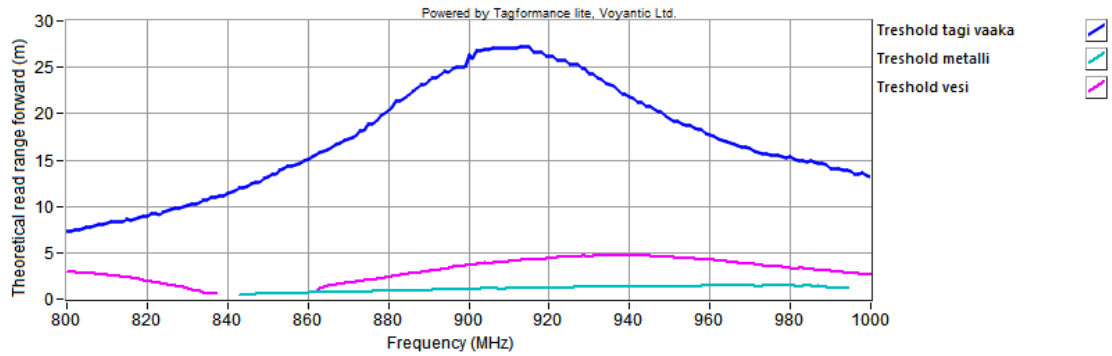
Taulukko 4.5

Frequency	915 MHz
Power step	0,1 dB
Angle step	5 Deg

Passiiviselle tagille suoritettiin vastaavat mittaukset, mutta vain ilmassa. Lisäksi passiivisen tagin ominaistaajuus oli 860 MHz, jota käytettiin backscatter ja orientation sensitivity -mittausten asetuksissa.

4.3 Tulokset

Semipassiivisen tagin ominaislukutaajuutta ja teoreettisia lukuetaisyyksiä tutkittiin threshold -mittauksella. Ohjelman pyyhkäisyasetukset on lueteltuna taulukossa 4.3. Threshold -mittaukseen kuuluu forward linkin sekä reverse linkin mittaukset. Forward mittauksessa mittalaitteisto nostaa lukijan lähetysteho P_{EIRP} kunnes tagi vastaa. Reverse mittaustilanne voidaan ajatella olettamalla erillinen lähetys- ja vastaanottoantenni. Lähetysteho asetetaan sallittuun maksimiin $P_{max,EIRP} = 3,28$ W (EIRP, Effective isotropic radiated power). Lähetysantenni siirretään mahdollisimman kauas tagista, tagin vielä vastatessa. Tämän jälkeen siirretään vastaanottoantenni sellaiselle etäisyydelle tagista kunnes lukija, jonka herkkyys on -70 dBm ja antennivahvistus 4dBi pystyy vielä vastaanottamaan signaalin. Kuvassa 4.3. on esitetty threshold -mittauksen forward linkin teoreettiset lukuetaisyydet. Kuvasta huomataan, että semipassiivisen tagin ominaistaajuus osuu noin 915 MHz:n alueelle.



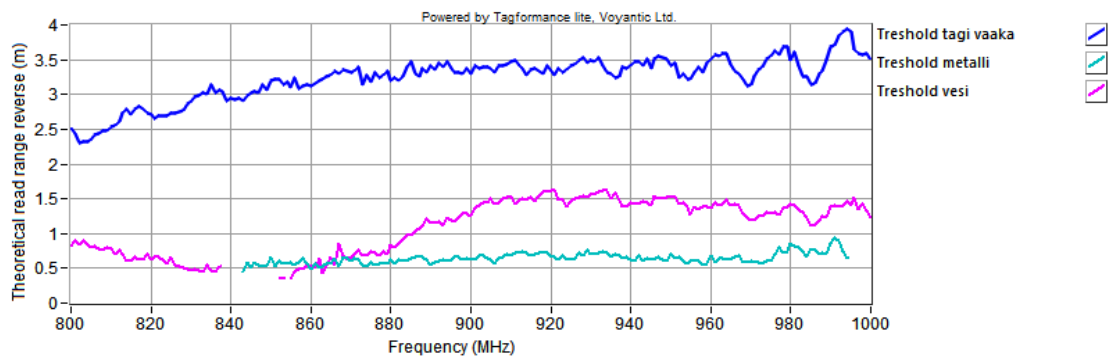
Kuva 4.3. *Threshold -mittauksen forward linkin teoreettiset lukuetaisyydet tsemipassiiviselle tagille taajuuden funktiona.*

Lisäksi kuvasta nähdään, kuinka vesiastian pinnalla olevan tagin lukuetaisyys heikkenee huomattavasti koko alueella ja 840–860 MHz:n välinen alue vaimenee mittausherkkyyden alapuolelle. Lisäksi tagin ominaistajuus siirtyy 935–940 MHz:n väliselle alueelle. Metallia vaimentaa signaalin suhteellisen tasaisesti koko mittaustaajuusalueella. Ohjelma laskee forward -linkin teoreettisen lukuetaisyyden maksimin R_{max} yhtälöllä

$$R_{max} = \sqrt{\frac{P_{max,EIRP}}{P_{tag}}} * \frac{c}{4\pi f}, \quad (42)$$

missä P_{tag} on lähetysteho, jolla tagi herää, c on valon nopeus tyhjiössä ja f on signaalin taajuus.

Semipassiivisen tagin teoreettinen maksimilukuetaisyys ilmassa on tagin ominaistajuudella yli 25 m, veden läheisyydessä suurimmillaan noin 5 m ja metallia vasten kahden metrin luokkaa. Kuvassa 4.4. on esitetty reverse linkin mittaustulokset. Huomattavaa on, että teoreettiset lukuetaisyydet heikkenivät huomattavasti semipassiiviselle tagille ilmassa. Lukuetaisyys ominaistajuudella on noin 3,5 m. Vesiastiaa vasten mitattuna tagin lukuetaisyys on parhaimmillaan noin 1,5 m ja metallia vasten noin 0,5 m. Mittaustulos näyttää ensivaikutelmaltaan erikoiselta, koska forward linkin lukuetaisyydet ovat huomattavasti suuremmat.



Kuva 4.4. *Threshold -mittauksen reverse -linkin teoreettiset lukuetaisyydet semipassiiviselle tagille taajuuden funktiona.*

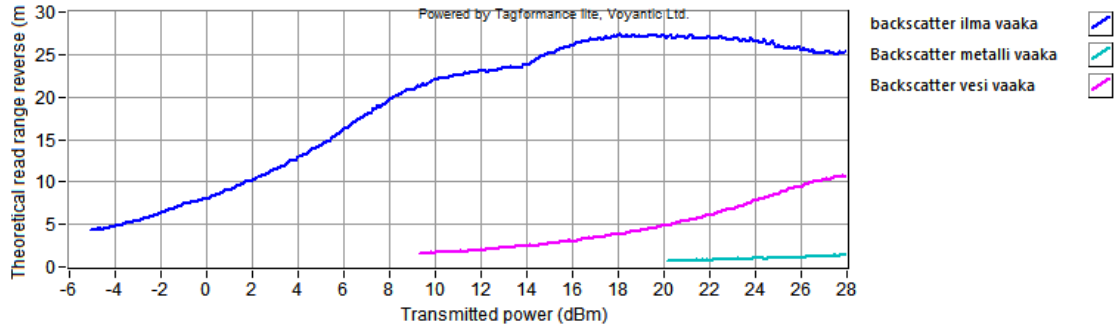
Reverse -linkin mittauksessa täytyy ottaa huomioon mittaustapa ja mitattavan kohteen ominaisuudet. Lähetystehoa P_{EIRP} pienennetään reverse-linkin mittauksessa sellaiseen arvoon, jolla tagi pystytään vielä lukemaan. Tilannetta kuvattiin aiemmin lähetysantennin siirtämisellä maksimietäisyydelle. Semipassiivisen tagin energiavarasto käynnistää tagin piirin herkästi pienelläkin lukijan teholla. Tagin antenni toimii kuitenkin passiivisesti, jolloin takaisin heijastuvan signaalin teho $P_{tag, BS}$ jää pieneksi ja lukuetaisyys lyhyeksi noin 3,5 metriksi. Alaviite BS viittaa takaisinheijastuneeseen signaaliin (backscatter). Tagformance 6 laskee teoreettisen reverse linkin lukuetaisyyden $R_{max,BS}$ yhtälöllä

$$R_{max,BS} = \sqrt{\frac{P_{tag,BS}}{P_{EIRP,BS,limit}}} * \frac{c}{4\pi f}, \quad (43)$$

missä $P_{EIRP, BS, limit}$ on vastaanotettavan signaalin minimitehon raja. Tagformance mitalaitteisto määrittää tämän -74dBm, joka vastaa 40 pW:n tehoa. Raja-arvo määriteltiin aikaisemmin -70 dBm, jolloin 4 dBi:n antennivahvistuksella voidaan laskea: $-74\text{dBm} * 4 \text{ dBi} = -70 \text{ dBm}$.

Backscatter-mittauksessa valittiin taulukon 4.4 mukaiset asetukset ja mittaukset suoritettiin semipassiiviselle tagille ilmassa, metallilevyä vasten sekä vesiastiaa vasten. Mittauksessa nostetaan lähetystehoa ja tutkitaan takaisinheijastuneen signaalin voimakkuutta. Kuvassa 4.5. on esitetty teoreettisen lukuetaisyyden maksimi lähetystehon funktiona. Kuvasta huomataan, että lukuetaisyyden teoreettinen maksimi semipassiiviselle tagille ilmassa kasvaa noin 18 dBm tehoon saakka, jonka jälkeen tapahtuu loiva lukuetaisyyden lasku. Suurimmillaan lukuetaisyys vastaa threshold –mittauksessa todettua yli 25 metrin etäisyyttä. Tämä saavutetaan noin 15 dBm:n kohdalla. Vesiastiaa vasten asetetun tagin lukuetaisyyden maksimi on noin 10 m, ja kasvaa lähetystehon kasvaessa. Metallilevyä vasten asetetun tagin lukuetaisyyden maksimi ei juuri kasva lähetystehon kasvaessa. Tagi vastaa noin 20 dBm:n kohdalla ja lukuetaisyys on lyhyt.

Semipassiivisen tagin lukuetaisyyden heikentyminen loppua kohti suurilla lähetystehoilla johtuu todennäköisesti tagin antennin ja IC-piirin impedanssien kompleksisten komponenttien epätasapainosta. Antennin impedanssin Z_a tulisi olla IC-piirin impedanssin Z_{IC} kompleksikonjugaatti $Z_a = Z_{IC}^*$. Suuret tehot vaikuttavat tagin ja antennin reaktansseihin niiden parasiittisten komponenttien kautta. [64]



Kuva 4.5. Backscatter –mittauksen teoreettiset lukuetaisyydet semipassiiviselle tagille lähetystehon funktiona.

Backscatter -mittaus osoittaa - mittausta paremmin teoreettisen lukuetaisyyden, koska lähetysteho P_{EIRP} on muuttujana, eikä sidottuna takaisinheijastuneen signaalin minimitehoon $P_{EIRP, BS, limit}$. Etäisyyden laskeminen tapahtuu yhtälöllä (43) ja mitattava teho on $P_{tag, Bs}$. Backscatter -mittaus laskee myös linkbudget käyrät. Linkbudget kertoo kumpi linkeistä rajoittaa lukuetaisyyttä, forward vai reverse. Linkbudget laskee rajoittavan tekijän forward ja reverse linkeille seuraavasti: Forward –linkille lasketaan Margin FL arvo yhtälöllä

$$Margin FL[dB] = P_{TX} + G_{TX Ant} - FSPL[dB] - P_{TF, TH} , \quad (44)$$

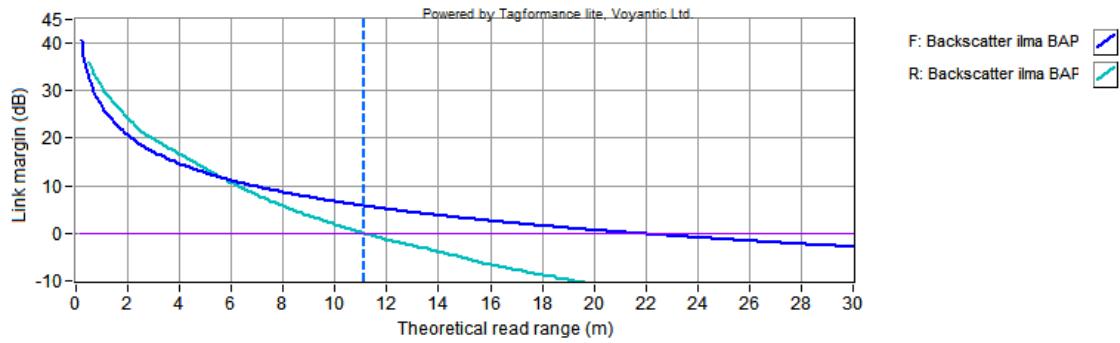
missä P_{TX} on lähetysteho $G_{TX ANT}$ on antennin vahvistus käytetyllä taajuudella, $FSPL[dB]$ vapaan tilavuuden häviöt (free space loss) ja $P_{TF, TH}$ on tagin käynnistymiseen vaadittu teho, arvo ei riipu lukuetaisyydestä R . Voyanticin manuaalin [63] käyrästöstä luettuna antennin vahvistus 915 MHz:n taajuudella on noin 8,6 dBi. Reverse –linkille Margin RL arvo lasketaan yhtälöllä

$$Margin RL[dB] = P_{RX} + G_{RX ANT} - FSPL[dB] - P_{TR, TH} , \quad (45)$$

missä P_{RX} on vastaanotettu teho, $G_{RX ANT}$ on vastaanottavan antennin vahvistus (8,6 dBi) ja $P_{TR, TH}$ on tagin käynnistymiseen vaadittu teho, arvo lukuetaisyyden R funktio. Vapaan tilavuuden häviöt $FSPL$ voidaan laskea yhtälöllä

$$FSPL[dB] = 20 \log_{10} R + 20 \log_{10} f - 27,55 , \quad (46)$$

missä f on taajuus MHz:na. Etäisyyden kasvua simuloidaan laskemalla lähetystehoa P_{TX} . Samalla mitataan vastaanotetun signaalin tehoa P_{RX} . Kuvassa 4.6. on esitetty semipassiivisen tagin linkbudget käyrät.



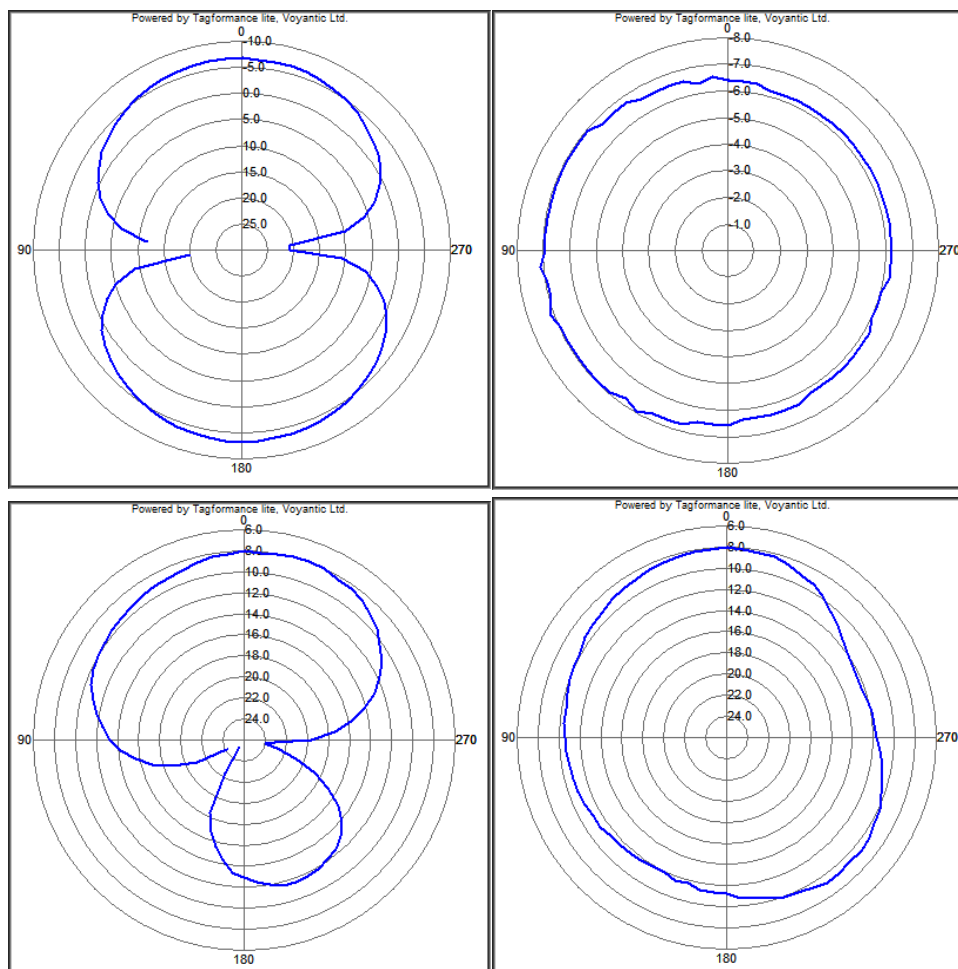
Kuva 4.6. Kuvassa esitetty semipassiivisen tagin signaalin linkbudget käyrät. Kuvassa on sinisellä esitetty forward-linkin teho ja syaanilla reverse-linkin teho.

Kuvasta huomataan, että linkkiä rajoittaa takaisin heijastuneen signaalin teho. Raja-arvona pidetään 0 dB:ta, joka alitetaan noin 11 metrin kohdalla. Tällöin yhtälö (45) on 0 dB, eli takaisin heijastuneen signaalin ja vastaanottavan antennin herkkyuden suhde vapaapaan tilan ja tagissa tapahtuviin häviöihin on yksi.

$$\frac{P_{RX} + G_{RX ANT}}{FSPL[dB] + P_{TL,TH}} = 1$$

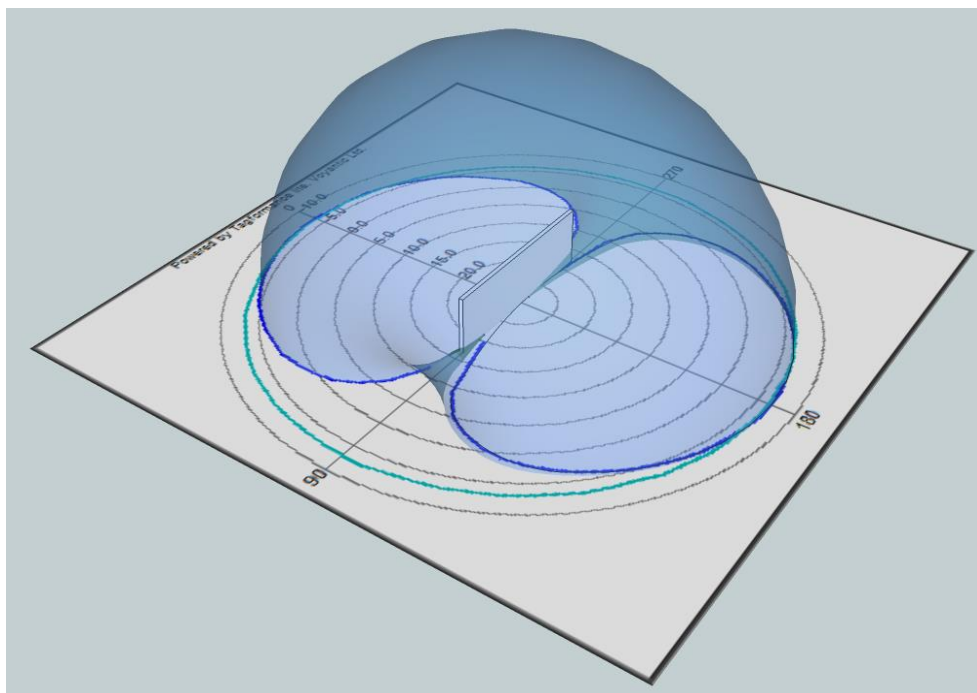
Semipassiivisen tagin energiavarasto käynnistää piirin, jolloin tagin käynnissä pitämiin kuluva teho $P_{TL, TH}$ pitäisi olla hyvin pieni ja tyhjän tilan häviöt muodostavat suurimman osan häviöistä. Tilanteeseen voidaan vaikuttaa kasvattamalla lukijan antennin herkkyyttä.

Orientation –mittauksessa tarkastellaan pienintä lähetystehoa tagin ominaistajuudella, jolla tagi vastaa eri kulmista. Tagi asetettiin pyörivälle mittauspöydälle, jota käännettiin joka mittauksen jälkeen 5 astetta suhteessa anteeniin. Orientation -mittauksen asetukset on lueteltu taulukossa 4.5. Kuvassa 4.7. on esitetty säteilykuviot tageille ilmassa sekä vesiastiaa vasten. Metallipintaa vasten mittaus antoi erittäin heikon vasteen, ja sitä ei ole esitelty.



Kuva 4.7. Orientation -mittauksen muodostamat säteilykuviot semipassiiviselle tagille ilmassa (ylhäällä) sekä vedessä (alhaalla) tehon (transmitted power dBm) ja tagin antennin asennon funktiona. Kuvassa vasemmalla on tagi on vaaka-asennossa ja oikealla pystyasennossa.

Kuvasta huomataan, että kohtisuoraan sivusta vaaka-akselilla tagin antenni ei näy lukijan antennille. Kun tagi käännetään pystyasentoon lukijan antenni pitää kääntää myös, jotta polarisaatio säilyy. Pystyasennossa säteilykuvio on jatkuva ympäri tagia. Kuvassa 4.8 on esitetty 3d – mallinnettu säteilykuvion periaatekuva passiivitagille ilmassa.



Kuva 4.8. Mallinnettu säteilykuvio semipassiiviselle tagille ilmassa. Säteilykuvio on esitetty tummansinisellä. Syaani käyrä kuvaa toroidin pinnan kaarta kohtisuorassa tasoon.

Veden säteilykuvioista nähdään veden vaimennus selkeästi, kun mittaus tapahtuu vesias-tian läpi. Ilmassa mitatun tagin säteilykuvio on lähes symmetrinen toroidin lävistävän akselin suhteen.

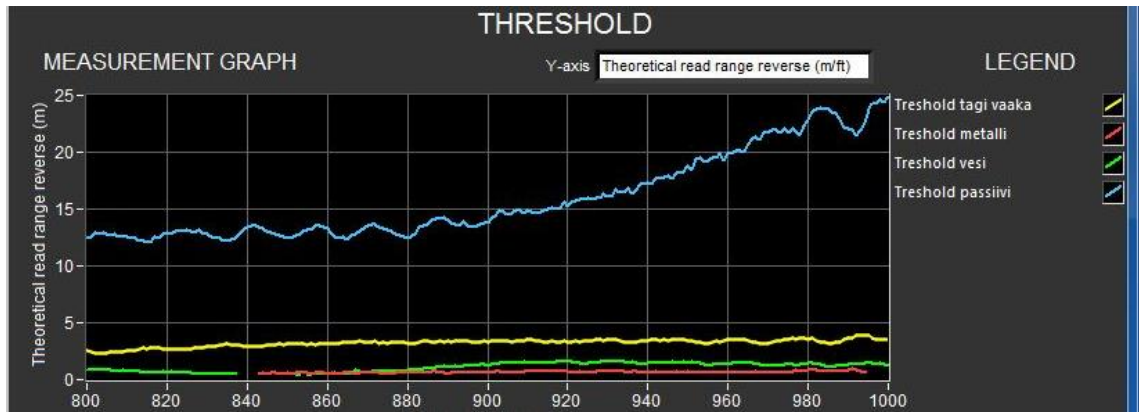
Passiivitagille tehtiin vastaavat mittaukset, kuin semipassiiviselle tagille. Ensin suoritettiin threshold -mittaus ja sitä on kuvassa 4.9. verrattu semipassiivisen tagin threshold -mittauksiin. Kuvasta huomataan, että passiivisen tagin ominaistajuus on 860 MHz. Forward -linkin teoreettinen lukuetaisyys jää huomattavasti semipassiivisen tagin lukuetaisyydestä.



Kuva 4.9. Threshold -mittauksen forward -linkin teoreettiset lukuetaisyydet passiiviselle tagille taajuuden funktiona. Sininen käyrä kuvaa passiivista tagia.

Passiivisen tagin lukuetaisyys jää noin kymmeneen metriin sen ominaistaajudella. Tämä on huomattavasti vähemmän, kuin semipassiivisella tagilla. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi passiivisen tagin piirin vaatimasta energiasta, joka otetaan lukijan signaalista eikä erillisestä energiavarastosta, kuten semipassiivisen tagin tapauksessa.

Kuvassa 4.10. on esitetty threshold –mittauksen reverse –linkin teoreettiset lukuetaisyydet taajuuden funktiona passiiviselle tagille ja verrattu niitä semipassiivisen tagin vastaaviin.



Kuvassa 4.10. Threshold -mittauksen reverse-linkin teoreettiset lukuetaisyydet passiiviselle tagille.

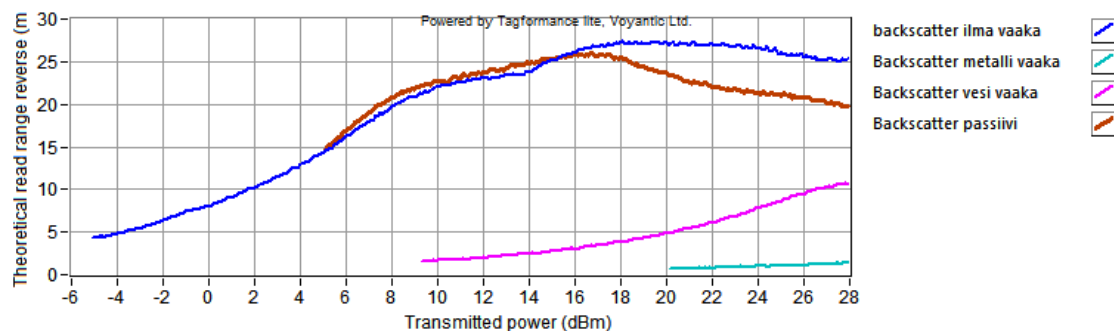
Passiivisen tagin teoreettinen reverse -linkin lukuetaisyys kasvaa taajuuden kasvaessa. Ominastaajudella 860 MHz saavutetaan noin 13 metrin teoreettinen lukuetaisyys. Passiivinen tagi suoriutuu näennäisesti paremmin reverse –linkin mittauksessa kuin semipassiivinen, koska käytetyn lähetystehon täytyy olla huomattavasti suurempi. Tämä johtuu siitä, että piiri vaatii energiaa heräämiseen, ja mittauksessa lähetysteho on sidoksissa takaisinheijastuneen signaalin minimitehoon -70 dBm. Molemmat tagit käyttävät kuitenkin vastaamiseen pelkästään moduloitua lukijan signaalia, joka heijastetaan takaisin lukijaan. Yhtälöstä (42) voidaan ratkaista P_{tag} , jolloin saadaan kuva minimitehosta, jolla piiri vastaa. P_{tag} voidaan laskea yhtälöllä

$$P_{tag} = \frac{P_{max,EIRP}}{\left(\frac{4\pi f R_{max}}{c}\right)^2}, \quad (47)$$

missä $P_{max, EIRP} = 3,28 \text{ W}$ [Tagformance manual], f passiiviselle tagille 860 MHz ja semipassiiviselle 915. R_{max} passiiviselle noin 10 m ja semipassiiviselle noin 27 metriä. Tästä seuraa että passiivisen tagin vastaukseen vaadittu minimiteho P_{tag} on noin 25 μW ja semipassiiviselle 3,1 μW . On otettava huomioon, että tagit eivät ole samanlaisia. Niissä tapahtuu häviöitä, jotka riippuvat antennin ja piirin ominaisuuksista sekä signaalin taajuudesta. Lasketut tehot ja niiden ero antaa kuitenkin kuvan tehon suurusluokasta, joka kulutetaan semipassiivisen tagin paristosta luvun aikana.

Backscatter -mittauksessa passiivinen tagi pärjasi semipassiivista heikommin. Kuvasta 4.11. nähdään passiivisen sekä semipassiivisen backscatter –mittauksen reverse

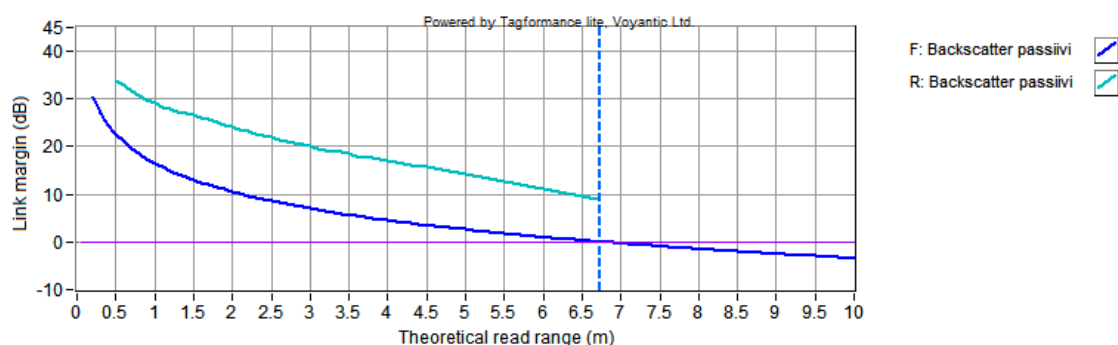
–linkin lukuetaisyys lähetystehon funktiona. Kuvasta huomataan että semipassiivinen tagi herää huomattavasti pienemmällä lähetysteholla, kuin passiivinen. Backscatter -mittauksessa käytettiin lähetystehon alarajana -5 dBm. Semipassiivinen tagi heräsi mittaus-
tehon alarajalla -5 dBm ja passiivinen noin 5 dBm lähetysteholla.



Kuva 4.11. Backscatter- mittaus. Teoreettinen reverse –linkin lukuetaisyys lähetystehon funktiona. Sinisellä semipassiivinen ja punaisella passiivinen tagi.

Kuvasta huomataan myös, kuinka lukuetaisyyden maksimi ei kasva lineaarisesti suhteessa lähetystehoon vaan saturoituu ja alkaa laskea suurilla lähetystehoilla. Passiivisen tagin teoreettinen lukuetaisyys lähtee laskemaan noin 17 dBm kohdalla. Semipassiivisen ja passiivisen tagin käyrät seuraavat toisiaan suhteellisen hyvin 5-16 dBm välillä, jonka jälkeen alkaa syntyä eroa. Laskua suurilla tehoilla selitettiin aikaisemmin tagin antennin ja IC-piirin impedanssien kompleksisten komponenttien epätasapainolla, kun teho kasvaa riittävästi.

Backscatter –mittaus laskee mitatulle tagille linkbudged käyrät, joista voidaan lukea kumpi linkki rajoittaa lukuetaisyyttä. Kuvassa 4.12. on esitetty linkbudged mittauksen käyrät passiiviselle tagille.

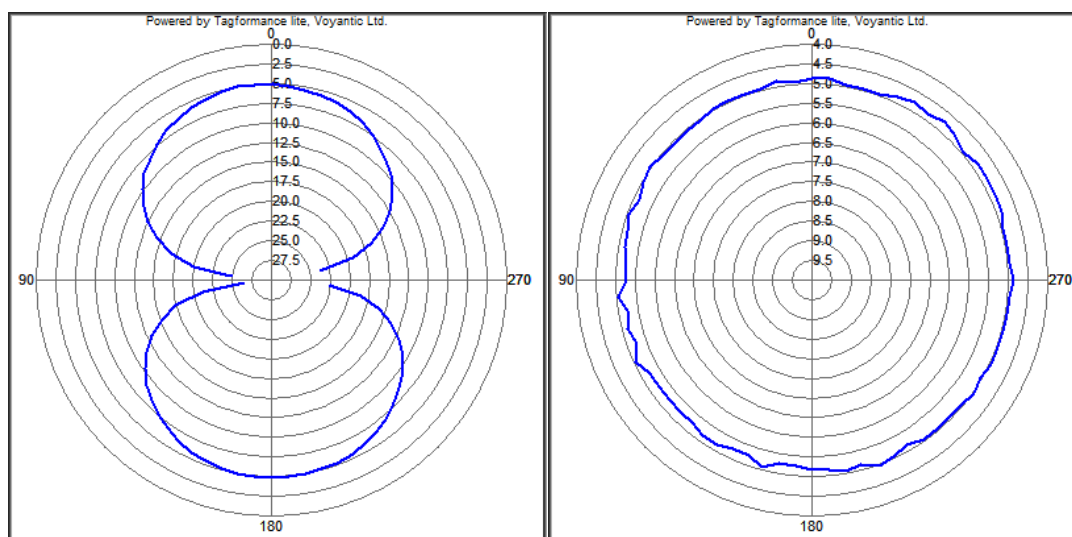


Kuva 4.12. Kuvassa esitetty passiivisen tagin signaalin linkbudget käyrät. Kuvassa on sinisellä esitetty forward-linkin teho ja syaanilla reverse-linkin teho.

Kuvasta nähdään, että forward –linkin käyrä alittaa 0 dB rajan ensin, jolloin yhtälö (44) menee nolaksi. Lukijan lähetysteho rajoittaa forward –linkin lähetystehon mittauksissa 3,28 W [62] ja käytännön sovelluksissa standardin mukaan 3,2 W EIRP tai 2 W ERP

(effective radiated power) [65]. Forward –linkki rajoittaa lukuetaisyyttä, koska passiivitagin piiri kuluttaa lähetystehoa. Jos lähetysteho ei ole riittävän suuri, tagin piiri ei herää.

Orientation -mittaus suoritettiin passiivitagille ja kuvassa 4.13. on esitetty mitauksesta muodostetut säteilykuviot. Säteilykuviot ovat lähes symmetrisiä ja muodoltaan yhteneviä semipassiivisen tagin säteilykuvioihin.



Kuva 4.13. Orientation -mittauksen muodostamat säteilykuviot passiiviselle tagille ilmassa tehon (transmitted power dBm) ja tagin antennin asennon funktiona.. Kuvassa vasemmalla on tagi on vaaka-asennossa ja oikealla pystyasennossa.

Säteilykuvioista voidaan päätellä, että molemmissa tageissa käytetään dipoliantennia. Passiivitagin säteilykuvio pysähtyy noin 5 dBm kohdalle maksimissaan. Semipassiivisen tagin säteilykuvio ylsi noin 6,5 dBm kohdalle.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityössä on tutkittu uusia ja uusiutuvia energialähteitä langattomissa sensori ja tunnistusovelluksissa. Tutkimusaineistona käytettiin alan kirjallisuutta. Tavoitteena on ollut luoda yleiskuva käytössä olevista teknologioista ja mahdollisesti lupaavista kehityssuunnista esittelemällä esimerkkejä jo käytössä tai saatavilla olevista teknologioista sekä tutkimustasolla olevista lupaavista teknologioista. Kirjallisuutta löytyi tutkimustasolla olevista teknologioista suhteellisen hyvin riippuen aihe alueesta. Jo käytössä olevista teknologioista aineistoa löytyi myös suhteellisen hyvin poislukien teknologiat, jotka eivät olleet vielä taloudellisesti tai teknisesti kannattavia.

Energiavarastoja on paljon erilaisia. Tässä työssä ne on rajattu kondensaattoreihin ja paristoihin, koska nämä kaksi aluetta ovat käytetyimmät energiavarastot RFID-laitteissa. Paristoteknologia on alue, joka koskettaa erittäin montaa alaa, joten aineiston läpikäyminen ja valikoiminen osoittautui haasteelliseksi. Työssä on esitelty yleisimmät paristotyyppit sekä joustavat paristoteknologiat tiettyjen RFID-sovelluksien erityisvaatimuksia ajatellen. Joustavista paristoteknologioista esiteltiin jo käytössä olevat ja markkinoilta löytyviä paristoja sekä esimerkki ladattavasta joustavasta akusta. Kondensaattoreista on valittu energiavarastoiksi tarkoitetut superkondensaattorit. Yleistäen voidaan sanoa, että kondensaattorit kestävät paremmin lataus ja purku -jaksoja kuin paristot ja niiden elinikä on pidempi. Tilanteissa, joissa energiaa on saatavilla katkonaisesti, voidaan kondensattoria käyttää väliaikaisena varastona. Semipassiivisissa tageissa käytettävät energialähteet ovat paristoja ja paristo määrittää tagin eliniän.

Uusiutuvilla energialähteillä pyritään takaamaan jatkuva energian saatavuus toimintaympäristön asettamissa rajoissa ja ne tulevat tarpeellisiksi erityisesti sellaisissa anturisovelluksissa, missä anturin tarvitsee kerätä tietoa ja tallentaa jatkuvasti. Lämpösähköllä on jo kaupallisia sovelluksia, kuten kellot ja teknologian kehitys on edelleen käynnissä. Parannusmahdollisuuksia on materiaalitekniikan alueella, josta saattaa seurata maksimitehopisteen seurannan lisäoptimoinnin tarve. Mikrosähkömekaaninen energian varten otettavimmat teknologiat ovat pietsosähköön sekä hankaussähköön perustuvat elementit. Pietsosähköisillä elementeillä on kaupallisia sovelluksia ja kehitysmahdollisuudet ovat materiaalitekniikan sekä maksimitehopisteen seurannan alueilla. Hankaussähköön perustuvista elementeistä löytyi vain kokeellisessa vaiheessa olevia sovelluksia, mutta teknologia vaikuttaa lupaavalta. Radiotaajuisen energian keräys on todettu toimivaksi, mutta osoittaa lähinnä välillisesti olevia kehitysmahdollisuuksia, johtuen rajoitteista lähetystehoista. Tämä rajaa kehityksen laitteen energiatehokkuuden parantamiseen sekä maksimitehopisteen seurantaan. Tuulisähkö edustaa kypsää teknologiaa ja sen toimivuus on vahvasti paikasta riippuvainen. Turbiinien hyötysuhteen parantaminen on lähinnä tuuliolosuhteisiin optimointia. Systeemin toimintaa pystytään optimoimaan maksimitehopisteen seurannalla. Huomioitavaa on, että pienistä milliwattiluokan voimaloista sekä niiden optimoinnista löytyi suhteellisen vähän tietoa. Valosähköiset paneelit ovat

yksi käytetyimmistä ja kaupallisesti asemansa vakiinnuttaneista teknologioista. Valosähköiset paneelit yhdistävät jo toimivaksi osoitetun teknologian sekä tulevaisuuden parannusmahdollisuudet materiaali tekniikan sekä maksimitehopisteen seurannan osalta.

Diplomityön mittausosiossa pyrittiin todentamaan semipassiivisen tagin energia-varaston tuomat edut verrattuna tavalliseen passiiviseen tagiin. Mittauksia suoritettaessa oli tärkeää ymmärtää mitä mitattiin ja miten. Johtuen mittaustavasta semipassiivinen tagi sai näennäisesti huonompia tuloksia threshold –reverselinkin mittauksessa. Semipassiivisen tagin huomattavasti pidempi lukuetaisyys pystyttiin selkeästi demonstroimaan sekä esittämään syyt siihen. Mittausprosessi osoitti kuitenkin hyvin, miten backscatter -tyyppinen tagi hyötyy erillisestä energiavarastosta.

Diplomityötä tehdessäni oli mielenkiintoista huomata monien materiaalien toistuvan eri teknologioissa esimerkiksi erilaiset hiilinanoputkiin perustuvat materiaalit. Lisäksi monet teknologioista olisi suhteellisen yksinkertaista valmistaa teknologian demonstroimista varten. Uudet teknologiat pyrkivät ylittämään vanhojen teknologioiden taloudellisen ja teknisen toteuttamiselpoisuuden asettamat rajat. Poikkeuksena sellaiset sovel-lusalueet, joissa ympäristötekijät ovat erittäin poikkeukselliset ja joissa taloudellisella näkökulmalla ei ole juuri väliä. Esimerkkinä näistä mars-roverin plutoniumin hajoamiseen perustuva lämpösähköinen energialähde.

Työn vaikein osuus oli käydä suuret määrät julkaisuja läpi ja valita niistä sopivat työhön. Tästä seurasi, että henkilökohtainen näkemykseni syveni ennestään minulle tuntemattomalla alueella.

LÄHTEET

- [1] Land, J. History of RFID [WWW]. [viitattu 30.1.2014]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1109/MP.2005.1549751>
- [2] Dobkin, D.M. The RF in RFID. Oxford 2008, Newnes. 493p.
- [3] Stancil, D. D. et al. Demonstration of communication using neutrinos [WWW]. [Viitattu 8.2.2014] saatavissa: <http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S0217732312500770>
- [4] Yu, S., Xu, S., Zhang, S., Yang, X. Distributed detection in landslide prediction based on wireless sensor networks. [WWW] [viitattu 16.3.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6321086>
- [5] Edited by Nemaï Chandra Karmakar. Handbook of smart antennas for RFID systems Hoboken 2010. John Wiley & Sons. 620 p.
- [6] Ahson, S., Ilyas, M. RFID Handbook. Boca Baton 2008. CRC Press. 689p.
- [7] Ray, M., Ruokokoski, S., Kandel, S., Möttönen, M., Hall, D. Observation of Dirac monopoles in a synthetic magnetic field. [WWW] [viitattu: 2.8.2014] Saatavissa: <http://www.nature.com/nature/journal/v505/n7485/pdf/nature12954.pdf>
- [8] Novakowski, M., Kelkar, N. Faradays law in presence of magnetic monopoles [WWW] [viitattu: 2.8.2014] Saatavissa: <http://arxiv.org/abs/physics/0508099v1>
- [9] D. G. Fang. Antenna theory and microstrip antennas. Boca Baton 2010. CRCPress. 295p.
- [10] Panasonic Overview of lithium ion batteries [WWW] [viitattu: 21.6.2014] Saatavissa: http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic_LiIon_Overview.pdf
- [11] Lighting global. Lithium – ion battery overview. Technical notes. [WWW] [viitattu: 21.6.2014] Saatavissa: http://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/67_Is-sue10_Lithium-ionBattery_TechNote_final.pdf
- [12] Aifantis, K., Hackney, S., Kumar, R. High energy density lithium batteries. Winheim 2010. Wiley-VCH. 257p.
- [13] Lee, J-S., Kim S., Cao, R., Choi, N-S., Liu, M., Lee, K., Cho, J. Metal – air batteries with high energy density: Li –Air versus Zn – Air. [WWW] [viitattu: 26.2014] Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.201000010/pdf>
- [14] Nguyen, T., Fraiwan, A., Choi, S. Paper-based batteries: a review. [WWW] [viitattu: 7.7.2014] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2013.11.007>

- [15] Harrop, P., Zervos, H. Batteries, supercapacitors, alternative storage for portable devices 2009-2019 [WWW] [viitattu: 18.8.2014] Saatavissa: www.idtechex.com/users/action/dl.asp?documentid=3825
- [16] Aliahmad, N., Agarwal, M., Shrestha, S., Varahramyan, K. Paper-based lithium-ion batteries using carbon nanotube-coated wood microfibers. [WWW] [viitattu 18.8.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6481448>
- [17] Volfkovich, Y., Mikhailin, A., Bograchev, D., Sosenkin, V., Bagotsky., V. Studies of supercapacitor carbon electrodes with high pseudocapacitance [WWW] [viitattu: 16.6.2014] Saatavissa: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/26963.pdf>
- [18] Young, H. Freedman, R. University physics. Painos 11. San Francisco 2004. Addison Wesley 1714p.
- [19] Grbovic, P., Delarue, P., Moigne, P. Selection and design of ultra-capacitor modules for power conversion applications: from theory to practice [WWW] [viitattu: 15.6.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06258933>
- [20] Halper, M., Ellenbogen, J. Supercapacitors: A Brief Overview. [WWW] [viitattu: 16.6.2014] Saatavissa: http://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf
- [21] Meng, C., Liu, C., Chen, L., Hu, C., Fan, S. highly flexible and all-solid-state paperlike polymer supercapacitors. [WWW] [viitattu: 15.6.2014] Saatavissa: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/nl1019672>
- [22] Mathúna, C., O'Donnell, T., Martinez-Catala, R., Rohan, J., O'Flynn, B. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks. [WWW] [viitattu: 18.4.2014] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2007.12.021>
- [23] Leonov, V., Thermoelectric energy harvesting of human body heat for wearable sensors. [WWW] [viitattu: 18.7.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6479224>
- [24] Fan, F., Tian, Z., Wang, Z. Flexible triboelectricgenerator! [WWW] [viitattu: 5.3.2014] saatavissa: http://www.nanoscience.gatech.edu/paper/2012/12_NE_04.pdf
- [25] Yeatman, E. Energy scavenging for wireless sensor nodes. [WWW] [viitattu: 18.7.2014] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1109/IWASI.2007.4420014>
- [26] Mitcheson, P., Yeatman, Rao, K., Holmes, S., Green, T. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. [WWW] [viitattu: 18.7.2014] Saatavissa: https://spiral.imperial.ac.uk:8443/bitstream/10044/1/1219/1/proc_IEEE_08.pdf
- [27] He, S., Chen, J., Jiang, F., Yau, D., Xing, G., Sun, Y. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. [WWW] [viitattu: 18.4.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6295618>

- [28] Shi Y., Wang, Y., Deng, Y., Gao H., Lin, Z., Zhu W., Huihong, Y. A novel self-powered wireless temperature sensor based on thermoelectric generators . [WWW] [viitattu: 3.4.2014] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414000533/pdf?md5=39ce2fb969f94d7f745cfefed1304816&pid=1-s2.0-S0196890414000533-main.pdf>
- [29] Atassi, I., Bauer, E., Nicolis, J., Dangel, B., Spendlhofer, L., Knospe, D., Faistauer, F. Current thermoelectric materials and an evaluation of thermoelectric material contacting approaches. [WWW] [viitattu: 3.4.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06273111>
- [30] Jovanovic, V., Ghamaty, S., Bass, J. New Thermoelectric Materials and Applications [WWW] [viitattu: 6.4.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6231554>
- [31] Shoko, E., Okamoto, Y., Kearley, G., Peterson, V., Thorogood, G. Novel K rattling: A new route to thermoelectric materials? [WWW] [viitattu: 22.4.2014] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4861641>
- [32] Sothmann, B., Sánchez, R., Jordan, A., Büttiker, M. Powerful energy harvester based on resonant-tunneling quantum wells. [WWW] [viitattu: 15.4.2014] Saatavissa: http://iopscience.iop.org/1367-2630/15/9/095021/pdf/1367-2630_15_9_095021.pdf
- [33] Miller, D., Optical Physics of Quantum Wells [WWW] [viitattu 17.4.2014] Saatavissa: <http://ee.stanford.edu/~dabm/181.pdf>
- [34] Montecucco, A., Knox, A. Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators. [WWW] [viitattu: 25.4.2014] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2014.2313294>
- [35] Montecucco, A., Siviter, J., Knox, A. Simple, fast and accurate maximum power point tracking converter for thermoelectric generators [WWW] [viitattu: 25.4.2014] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342530>
- [36] Chao, P. Energy harvesting electronics for vibratory devices in self-powered sensors [WWW] [viitattu 27.2.2014] saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2011.2167965>
- [37] Lueke, J., Moussa, W. A. MEMS-based power generation techniques for implantable biosensing applications [WWW] [viitattu: 28.2.2014] saatavissa: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/2/1433/pdf>
- [38] Roundy, S., Wright P. K., Pister K. S. J. Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters. [WWW] [viitattu: 28.2.2014] saatavissa: http://www.colorado.edu/MCEN/MEMSII/Papers/vibration_electricity_IMECE_2002.pdf
- [39] Hall, N., Okandan, M., Littrell, R., Bicen, B., Degerkin, F. Simulation of thin film damping and thermal mechanical noise spectra for advanced micromachined microphone structures [WWW] [viitattu: 28.2.2014] Saatavissa: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19081811>

- [40] Cottone, z F., Basset, P., Guillemet, R., Galayko, D., Marty, F., Bourouina, T. Bistable multiple-mass electrostatic generator for low-frequency vibration energy harvesting [WWW] [viitattu: 28.2.2014] saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6474379>
- [41] Zhang, X., Han, M., Wang, R., Meng, B., Zhu, F., Sun, X., Hu, W., Wang, W., Li, Z., Zhang, H. High – performance triboelectric nanogenerator with enhanced energy density based on single – step fluorocarbon plasma treatment. [WWW] [viitattu: 28.8.2014] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285513002061>
- [42] PI Ceramic GmbH. Piezo Technology [WWW] [viitattu: 8.3.2014] saatavissa: http://www.pieceramic.com/pdf/Piezoelectric_Effect_Piezo_Technology_Tutorial_PI_Ceramic.pdf
- [43] Priya, S., Inman, D. Energy harvesting technologies. New York 2009 Springer Science. 517p.
- [44] Badel, A., Guyomar, D., Lefeuvre, E., Richard, C. Piezoelectric energy harvesting using a synchronized switch technique [WWW] [viitattu: 10.3.2014] saatavissa: <http://jim.sagepub.com/content/17/8-9/831.full.pdf>
- [45] Yeager, D., Powledge, P., Prasad, R., Wetherall, D., Smith, J. Wirelessly-charged UHF tags for sensor data collection [WWW] [viitattu: 26.5.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4519381>
- [46] Carvalho, N., et al. Wireless power transmission: R & D activities within Europe [WWW] [viitattu: 27.5.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6734736>
- [47] Pinuela, M., Mitcheson, P., Lucyszyn, S. Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments. [WWW] [viitattu: 9.6.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6519964>
- [48] Tan, Y., Panda, S. Optimized wind energy harvesting system using resistance emulator and active rectifier for wireless sensor nodes [WWW] [viitattu 16.3.2014] saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5524087>
- [49] Morais, R., Matos, S., Fernandes, M., Valento, A., Soares, S., Ferreira, P., Reis, M. Sun, wind and water flow as energy supply for small stationary data acquisition platforms [WWW] [viitattu: 14.3.2014] saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2008.04.005>
- [50] Azevedo, J., Santos, J. Energy harvesting from wind and water for autonomous wireless sensor nodes [WWW] [viitattu 15.3.2014] saatavissa: <http://ccm.uma.pt/publications/2012/Azevedo2012a.pdf>
- [51] Kamoji, M., Kedare S., Prabhu, S. Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor [WWW] [viitattu 1.4.2014] Saatavissa: <http://dspace.library.iitb.ac.in/xmlui/bitstream/handle/10054/1598/5683.pdf?sequence=1>
- [52] Babinsky, H. How do wings work? [WWW] [viitattu: 19.3.2014] saatavissa: http://iops-science.iop.org/0031-9120/38/6/001/pdf/0031-9120_38_6_001.pdf

- [53] Edited by Markvark, T., Castañer, L. Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications. Oxford 2003. Elsevier. 984 p. Saatavissa: <http://www.kepu.dicp.ac.cn/photo/07sl02/Practical%20Handbook%20of%20Photovoltaics%20Fundamentals%20and%20Applications.pdf>
- [54] Arndt, R., Puto, R., Basic understanding of IEC standard testing for photovoltaic panels. [WWW] [viitattu: 18.7.2014] Saatavissa: <http://tuvamerica.com/services/photovoltaics/ArticleBasicUnderstandingPV.pdf>
- [55] Maycock, P., PV review: World Solar PV market continues explosive growth. [WWW] [viitattu: 18.7.2014] Saatavissa: [http://dx.doi.org/10.1016/S1471-0846\(05\)70452-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1471-0846(05)70452-2)
- [56] Raghunathan, V. et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems [WWW] [viitattu 20.2.2014] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1440973>
- [57] Weiß, R., Eckert, H., Schienle, M., Kühne, I., Frey, A. Krümmer, B. Efficient solar powered wireless sensor solution [WWW] [viitattu 21.2.2014] Saatavissa: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6686806
- [58] McCarthy, R. F. The shockley-queisser limit and practical limits of nanostructured photovoltaics. [WWW] [viitattu: 24.2.2014] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2012.6317915>
- [59] Yastrebova, N. V. High-efficiency multi-junction solar cells: current status and future potential Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, April 2007 [WWW] [viitattu 24.2.2014] saatavissa: <http://sunlab.site.uottawa.ca/pdf/whitepapers/HiEfficMjSc-CurrStatus&FuturePotential.pdf>
- [60] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E. D. Solar cell efficiency tables (version 43) Progress in photovoltaics: research and applications. [verkkojlehti] Prog. Photovolt: Res. Appl. 2014; 22:1–9 [viitattu: 24.2.2014] Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2452/pdf>
- [61] Kylberg, W., de Castro, F.A., Chabreck, P., Snodregger, U., Tsu-Te Chu, B., Nüesch, F., Hany, R. Woven electrodes for flexible organic photovoltaic cells [WWW] [viitattu 26.2.2014] saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201003391/pdf>
- [62] Voyantic tagformance lite manual. 2012 Voyantic Ltd. Viitattu: 13.4.2014
- [63] Voyantic RFID Measurement cabinet manual 2009 Voyantic Ltd Viitattu: 13.4.2014
- [64] Nikitin, P., Rao, K. Theory and measurement of backscattering from RFID tags. [WWW] [viitattu: 6.5.2015] Saatavissa: http://www.ee.washington.edu/faculty/nikitin_pavel/papers/AP-mag_2006.pdf

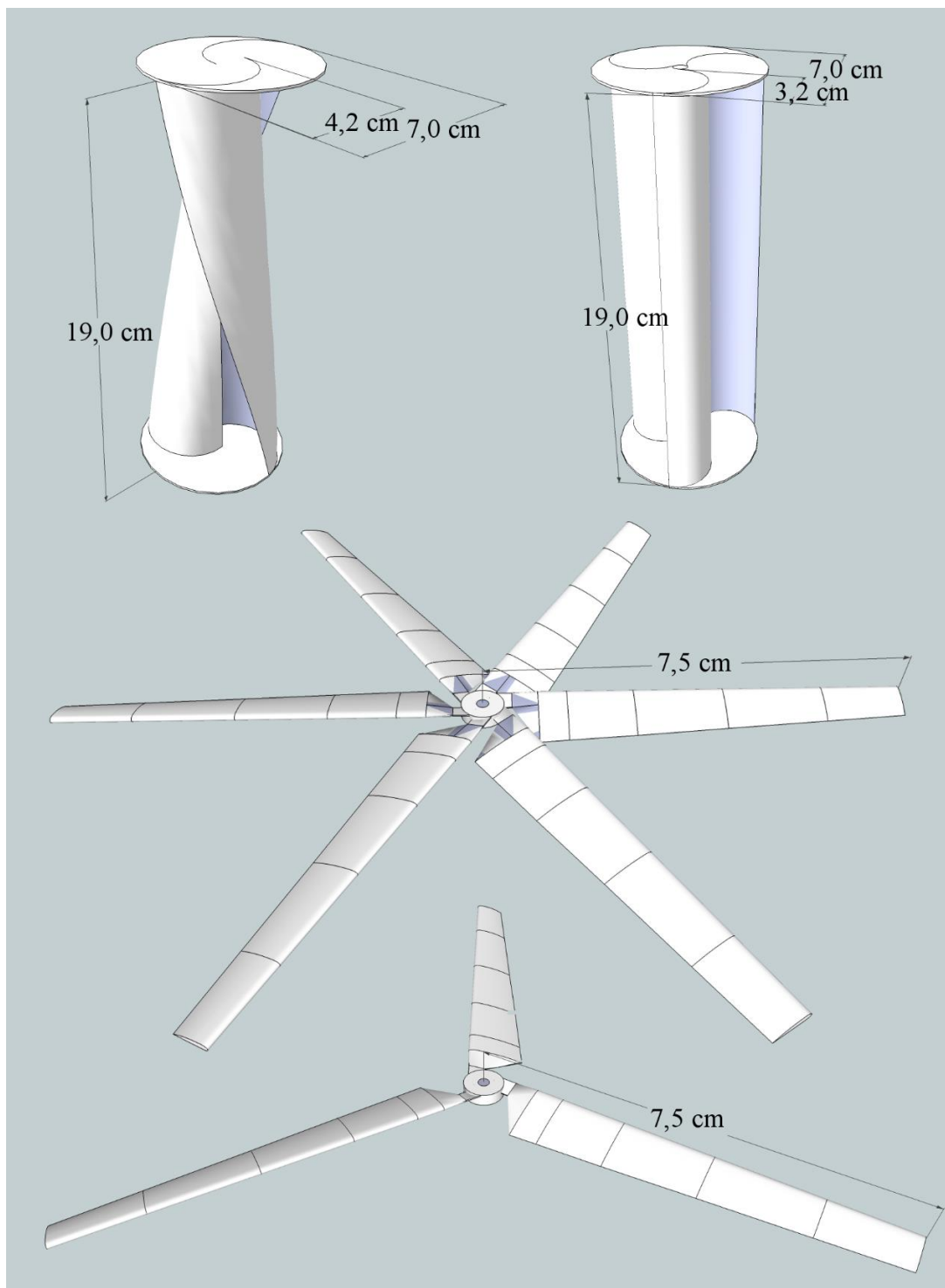
- [65] ETSI EN 302 208-1 V1.4.1, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio frequency identification equipment operating in the band 865 mhz to 868 mhz with power levels up to 2 W; Part 1: Technical requirements and methods of measurement. European telecommunications standards institute. 2011. www.etsi.org. Standardi. [WWW] [viitattu: 20.5.2014] Saatavissa: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/30220801/01.04.01_40/en_30220801v010401o.pdf

LIITE 1

COM-PANY	PRO-DUCT NAME	VOL-TAGE (V)	CHEMI-CAL SYSTEM	DI-MEN-SIONS (MM)	THICK-NESS (MM)	CAPA-CITY	TEMP RANGE (°C)	APPLICATIONS
PowerPa-per	STD-1	1.5	Zn/ MnO ₂	39	0.6	15 mAHr	-20 to 60	low cost for very-low to low current drain applications
PowerPa-per	STD-2	1.5	Zn/ MnO ₂	55	0.6	30 mAHr	-20 to 60	medium cost for low to moderate drain applications
PowerPa-per	STD-3	1.5	Zn/ MnO ₂	39	0.7	30 mAHr	-20 to 60	STD-3 offer double the capacity of STD 1
PowerPa-per	STD-4	1.5	Zn/ MnO ₂	29 x 23	0.7	13 mAHr	-20 to 60	miniaturized model for very-low current drain
Solicore	Flexion	3	Li/ MnO ₂	25x29, 48x23, 76x24	0.37		-10 to 60	smart cards, RFID
Blue Spark	TBT 1.5-21-A	1.5	Zn/ MnO ₂	2 sq.µm-10's sq.cm.		21-25 mAh	-30 to 54	RFID, data loggers, cosmetic patches, smart cards, display
Enfucell	SoftBat-tery	1.5	Metal-MnO ₂		0.3-0.7	3 mAh/cm ²	-25 to 60	RFID, greeting card, short life-time gadgets, cosmetics, drugs
Cymbet Corp.	Power FAB:	3.6	Lithium-ion		0.005-0.25	1 mAh/cm ²	-20 to 120	semiconductors, RFID, medical electronics, MEMS, smart cards
Cymbet Corp.	-CPF 804830L	3.8	Lithium-ion	80x48	0.03	30 mAh @ 1°C	-40 to 125	smart cards, other wireless applications
Cymbet Corp.	-CPF 141490L	3.6	Lithium-ion	14x14	0.09	0.45-0.55 mAh	-20 to 125	portable electronic devices, localized power source, semiconductors
Cymbet Corp.	-CPF 080809L	3.8	Lithium-ion	8x8	0.9	200µAh	-40 to 70	surface mount solutions
Front Edge Technology	Nano-Energy	3.0	Lithium-LiCo O ₂ (electrolyte is LiPON)	20x25	0.05-0.3	1 mAh	-40 to 170	smart cards, portable sensors, RFID tags
		3.0	Lithium-LiCo O ₂ (electrolyte is LiPON)	42x25	0.05-0.4	5 mAh	-40 to 170	smart cards, portable sensors, RFID tags

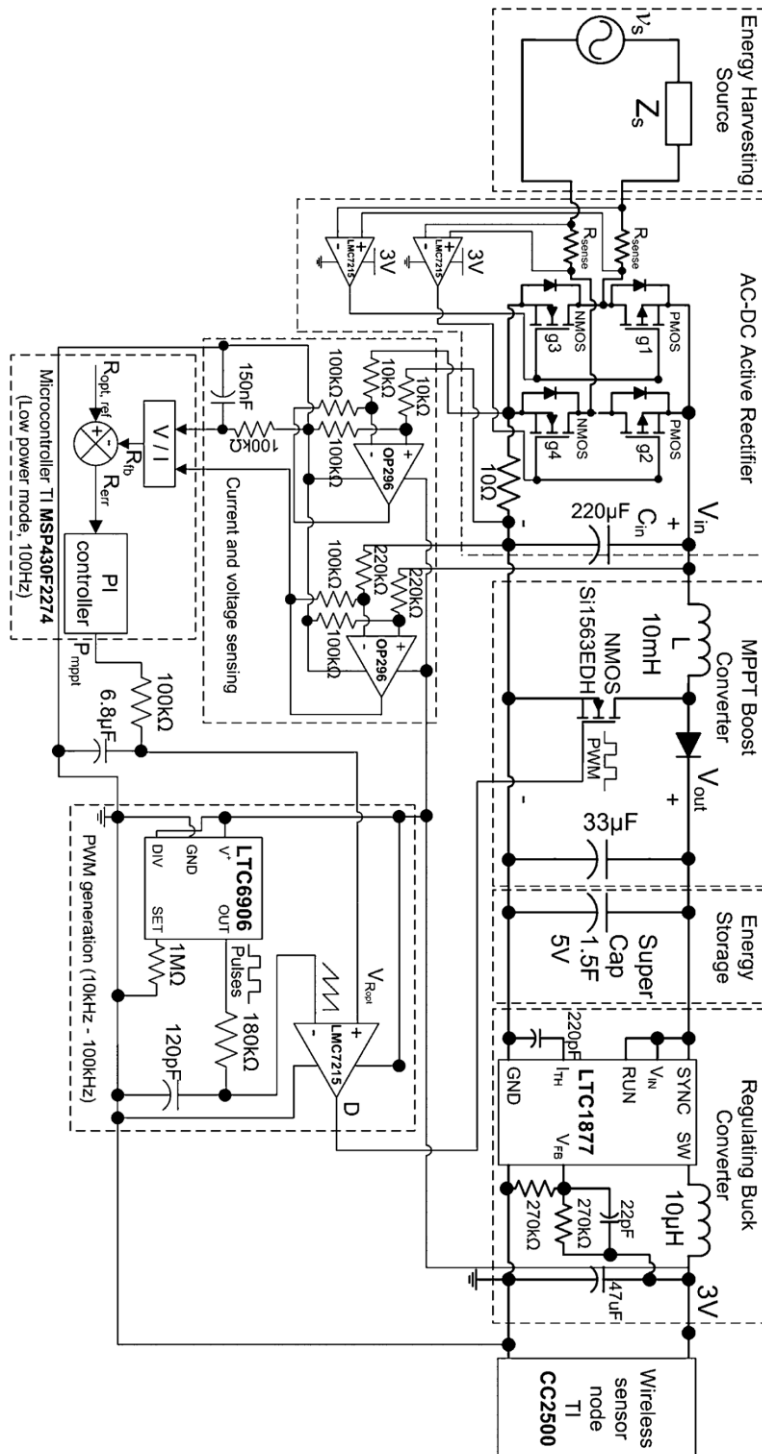
Infinite Power Solutions	LiTE*STAR	4.0	X-LiCoO ₂ (electrolyte is LiPON)	25.4x25.4	0.110	0.7 mAh		smart cards, RFID tags, medical devices, wireless sensors, real time clock, memory backup
Oxis Energy Ltd			Li-Sulphide					
VoltaFlex		3.0-4.0	Lithium+dry solid polymer electrolyte					
Ion Technology		3.5	Graphite-aluminum		0.2	30 mAh/4 cm ²		
Leeds-Lithium Power			Carbon-lithiated metal oxide (gel electrolyte)		0.25			smart cards, portable devices, military applications
Varta Microbattery		3.0	Li/Mn O ₂	22x29	0.44	25 mAh (@0.03 mA)	-10 to 60	Active smart cards, electronic tag, RFID

Taulukko lainattu muokattuna [15]

LIITE 2

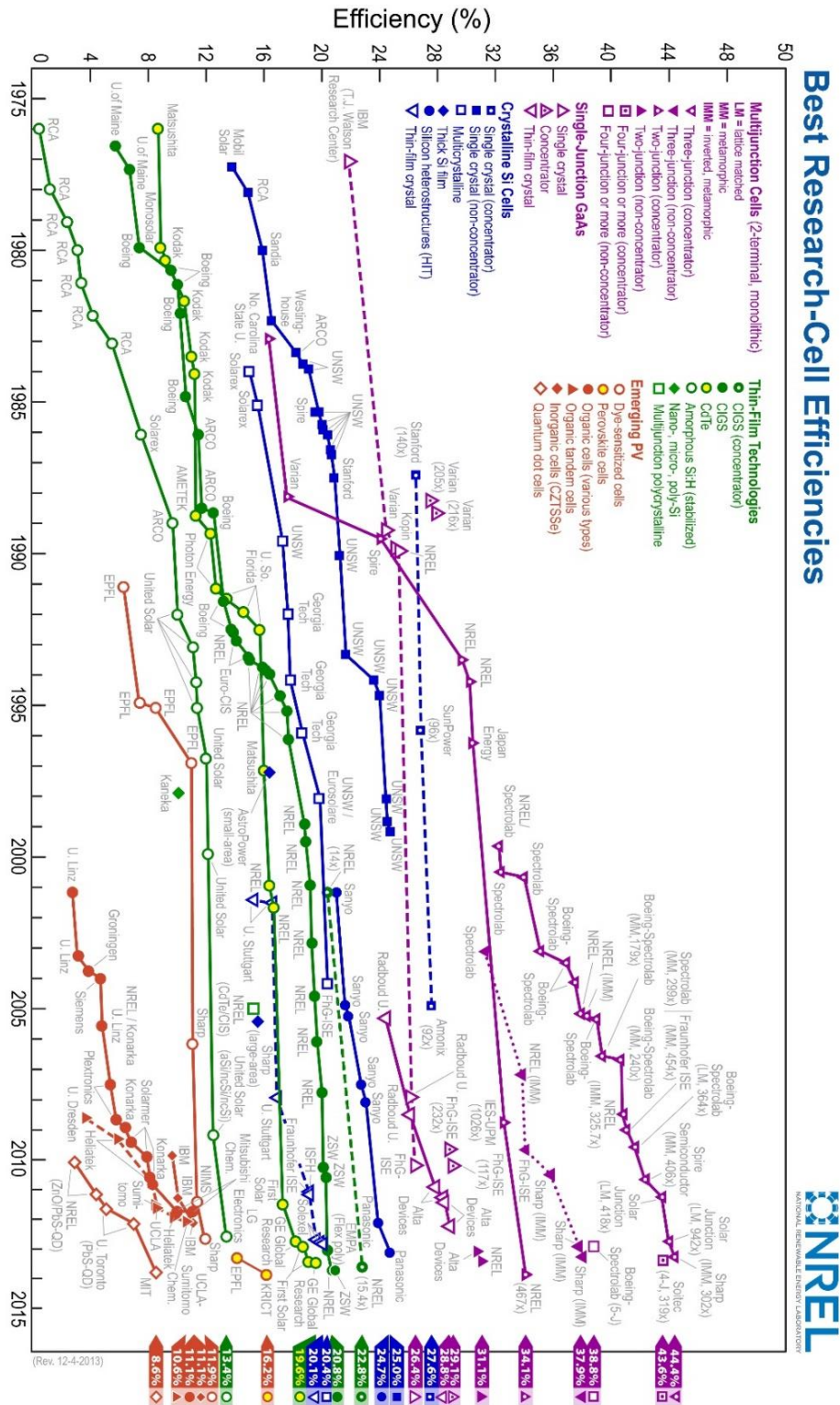
Kuvassa ylhäällä kaksi ja kolme lapaisen VAWT:n rakenne ja alhaalla kolme ja kuusilapaisen HAWT:n rakenne [50].

LIITE 3



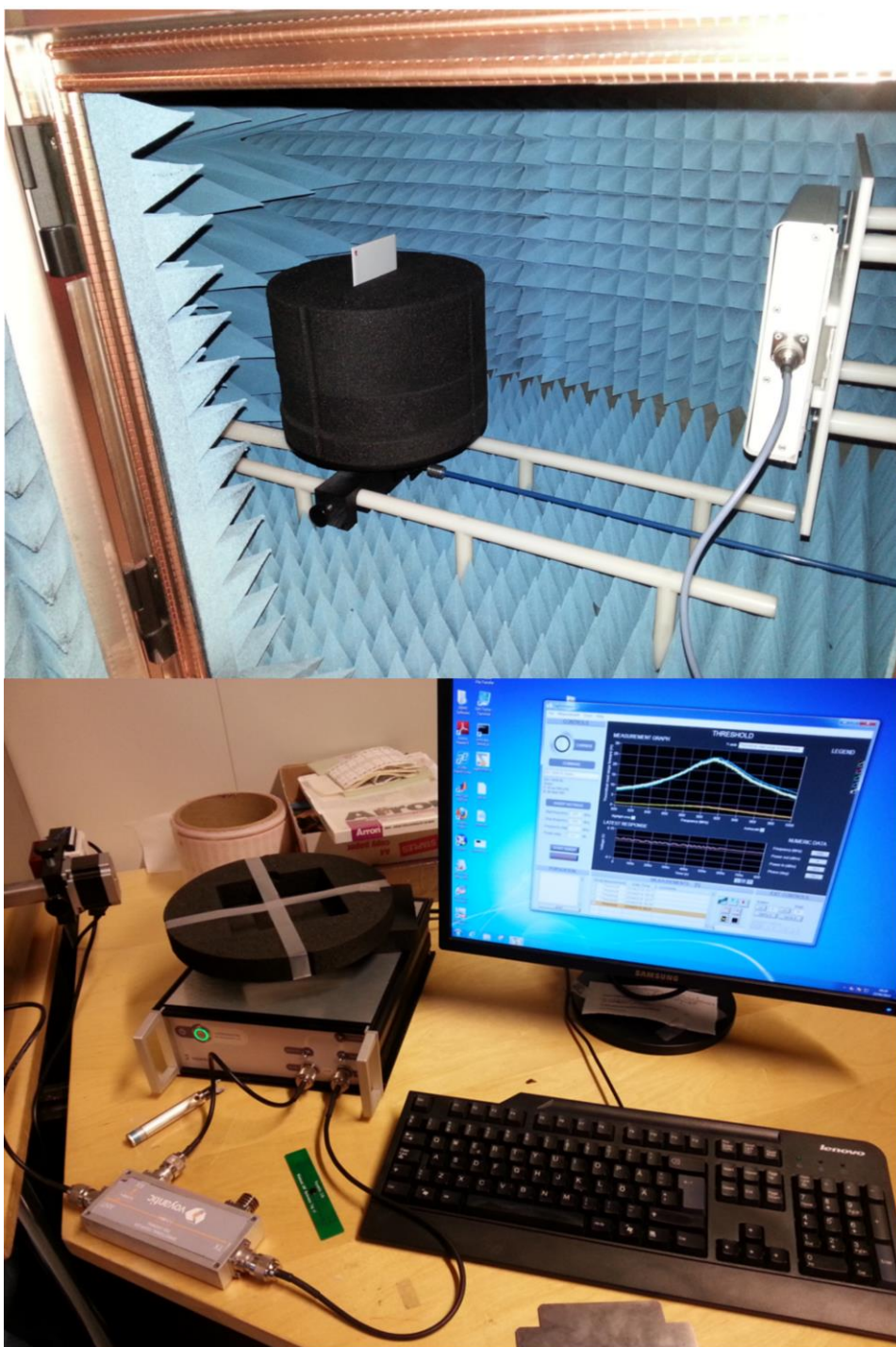
Kuvassa esitetty tuulivoimalan tasasuuntaus MOSFET –transistoreilla sekä maksimitehopisteenseuranta.

LIITE 4



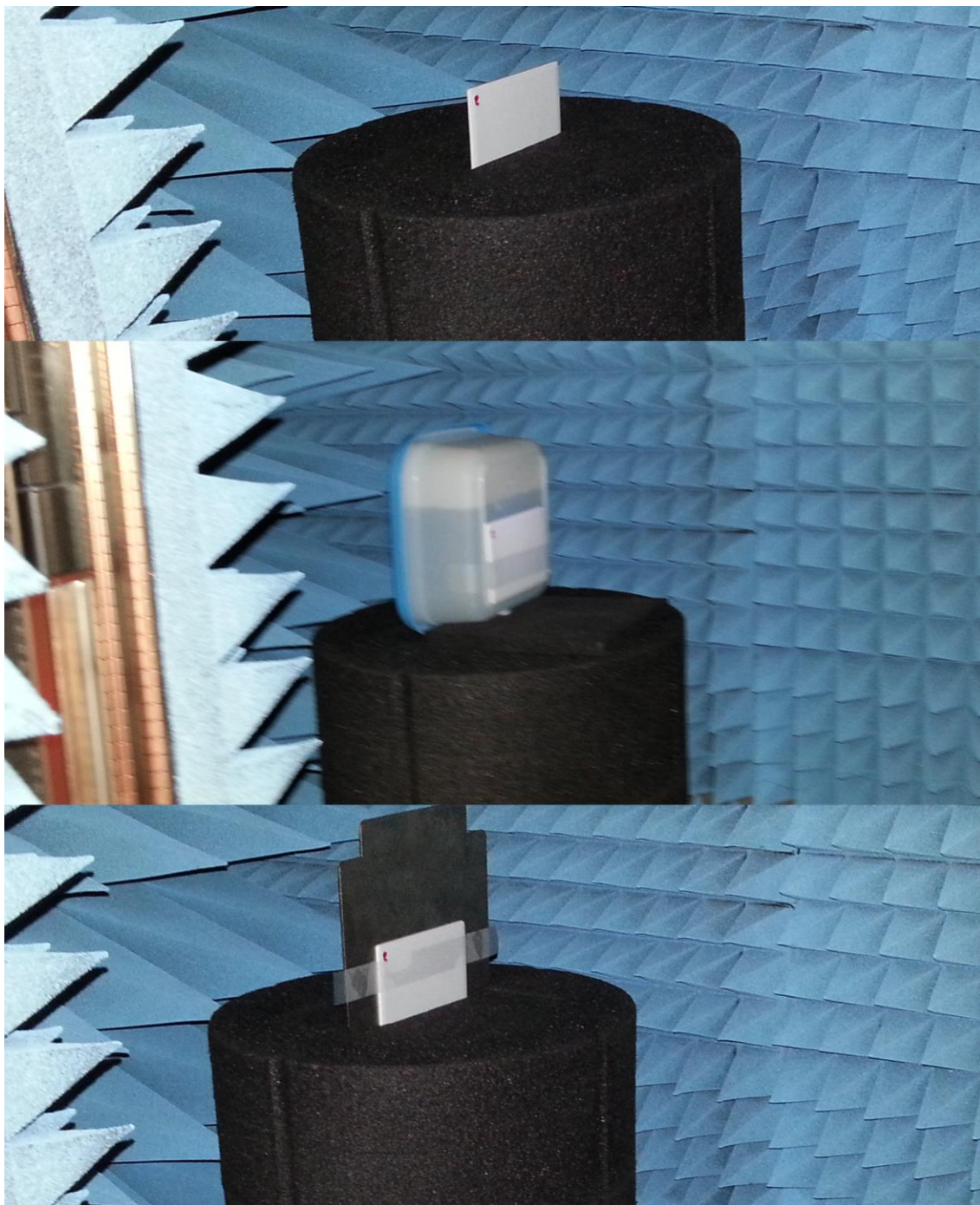
Liite 1 http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg [viitattu:20.2.2014]

LIITE 5



Kuvassa ylhäällä elektronikan laitoksen kaiuton kammio, mittauksissa käytetty antenni, sekä mittausalusta. Kuvassa alhaalla vasemmalla näkyy Tagformancen lite mittalaite kytkentöineen ja tietokoneella Tagformance 6 mittausohjelma.

LIITE 6



Kuvassa esitetty ylhäältä lukien: tagin mittaus ilmassa, vesiastiaa vasten, metallilevyä vasten. Orientaatiomittausta varten tagi käännettiin 90 astetta.